



# La marge sud-marocaine et les premières phases d'ouverture de l'océan Atlantique Central

Cinthia Labails

## ► To cite this version:

Cinthia Labails. La marge sud-marocaine et les premières phases d'ouverture de l'océan Atlantique Central. Géologie appliquée. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2007. Français. NNT : . tel-00266944

**HAL Id: tel-00266944**

**<https://theses.hal.science/tel-00266944>**

Submitted on 26 Mar 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE**

**SPECIALITE : GEOSCIENCES MARINES**

*Cinthia Labails*

## **La marge sud-marocaine et les premières phases d'ouverture de l'océan Atlantique Central**

*Volume 2 : illustrations*

Soutenue à Brest, le 5 mars 2007

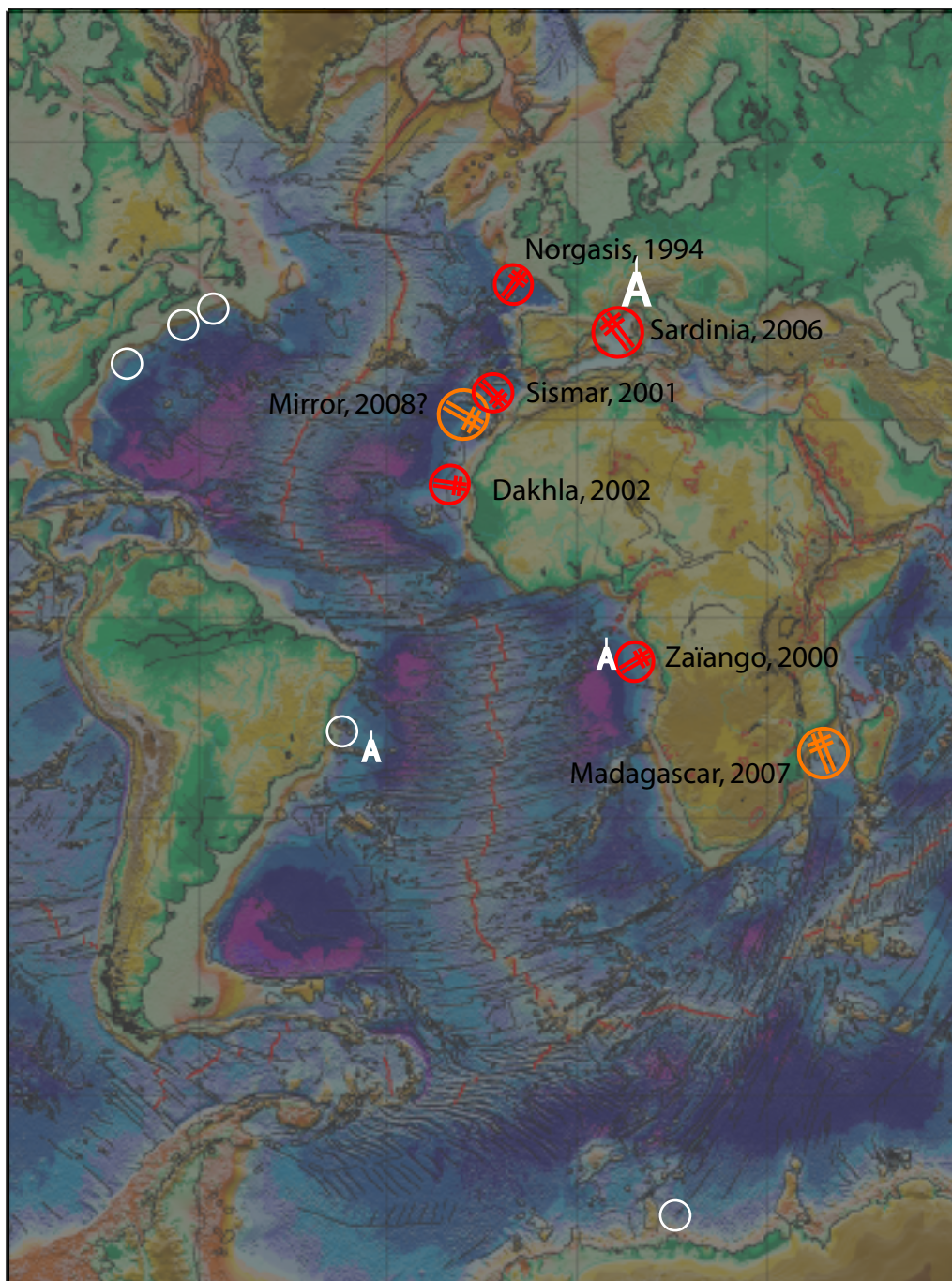
Devant la commission d'examen composée par :

D. Aslanian	Chercheur, IFREMER, Brest	Tuteur
F. Guillocheau	Professeur, Université de Rennes	Rapporteur
B. Le Gall	Chercheur, IUEM, Brest	Examineur
G. Manatschal	Professeur, EOST-ULP, Strasbourg	Rapporteur
L. Matias	Professeur habilité, Université de Lisbonne, Portugal	Examineur
J.-L. Olivet	Chercheur, IFREMER, Brest	Directeur de thèse
J.-Y. Royer	Professeur, IUEM, Brest	Président du Jury
P. Unternehr	Total, Pau	Examineur

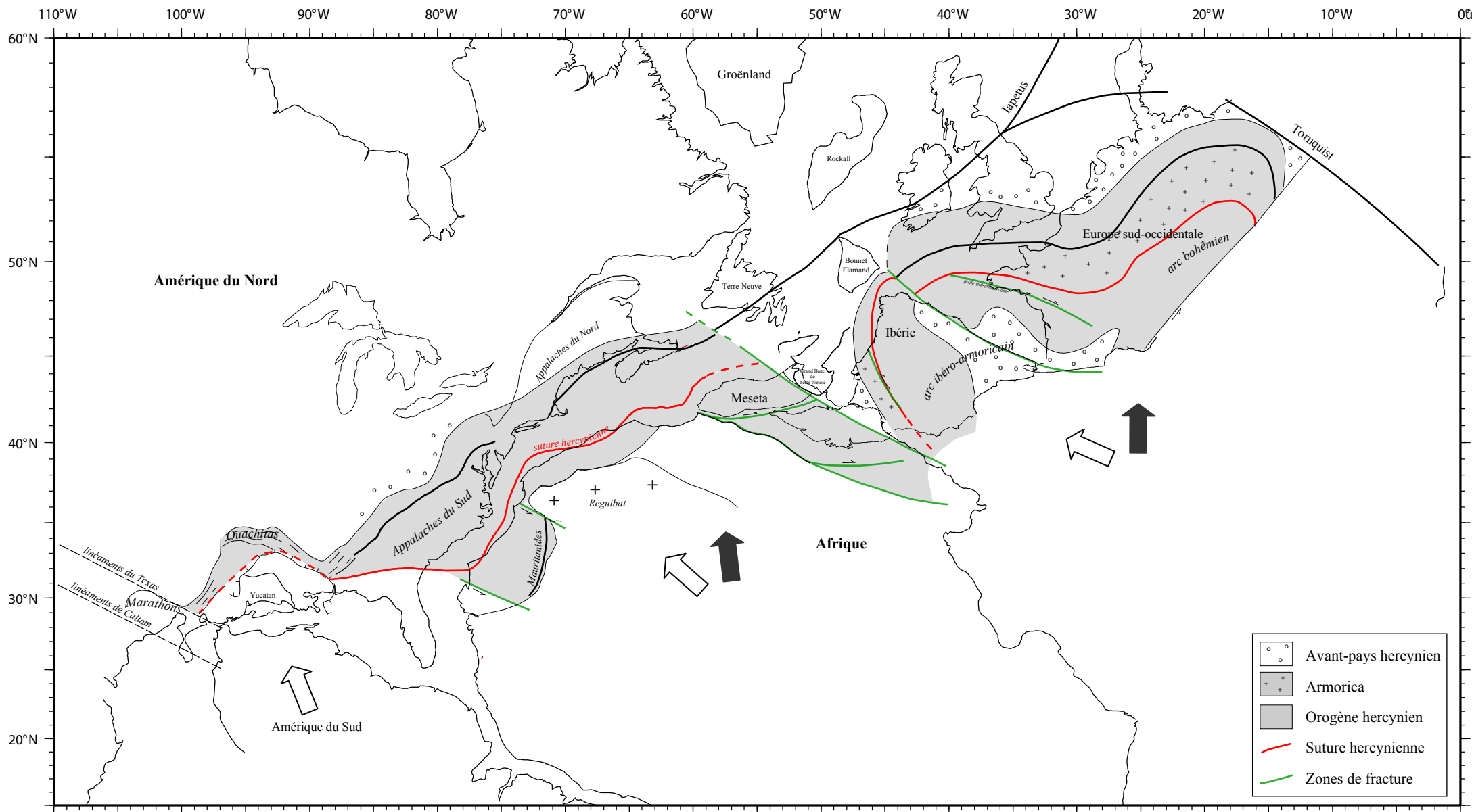


Chapitre I

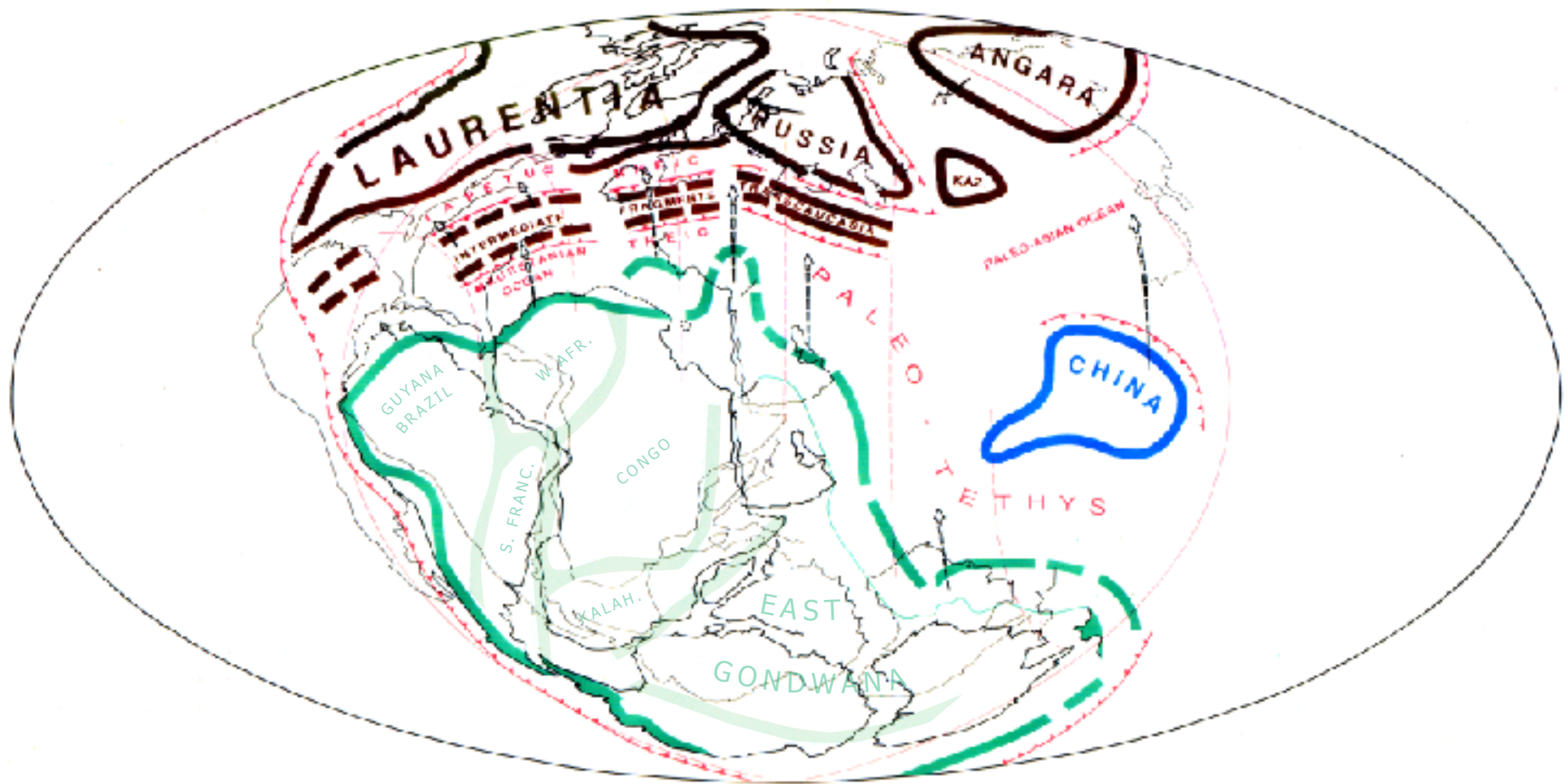
## Introduction – Vue générale



**Figure I-1 :** Localisation des campagnes conduites par Ifremer depuis 1994 utilisant la sismique réflexion couplée à la sismique réfraction (cercles rouges). Les cercles oranges représentent les campagnes prévues ou programmées. Les cercles blancs correspondent aux segments de marge homologue à une zone d'étude. Les projets de forages profonds IODP, dans lesquels le groupe est impliqué, sont indiqués par un "A" blanc.

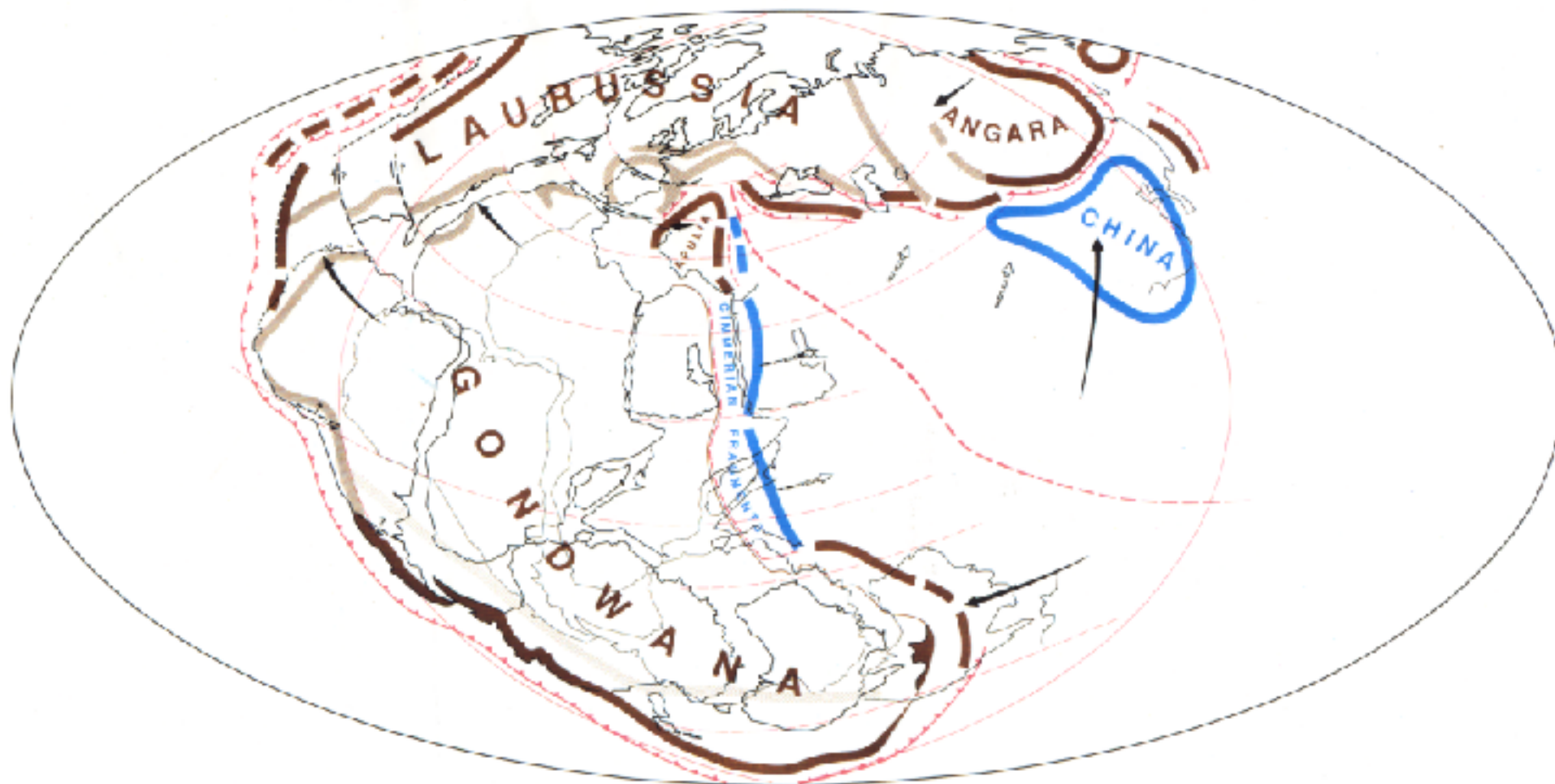


**Figure I-2 :** Représentation simplifiée de la chaîne hercynienne en Europe et dans le domaine de l'Atlantique Central. Les pôles utilisés sont issus de Olivet *et al.* (1996) pour les plaques Europe sud-occidentale, Ibérie, Groënland, Rockall, Bonnet Flamand, de notre étude pour les plaques Meseta et Afrique et de Olivet (*comm. pers.*) pour le Yucatan. La localisation de la chaîne a été faite à partir d'une compilation bibliographique (Arthaud and Matte, 1977 ; Pindell and Dewey, 1982 ; Lorenz and Nicholls, 1984 ; Secor *et al.*, 1986 ; Becq-Giraudon, 1994 ; Buffler and Thomas, 1994 ; Rankin, 1994 ; Bard, 1997 ; Matte, 2002). Les flèches noires correspondent à la phase Dévono-Carbonifère et les flèches blanches la phase alléghanienne, plus tardive.

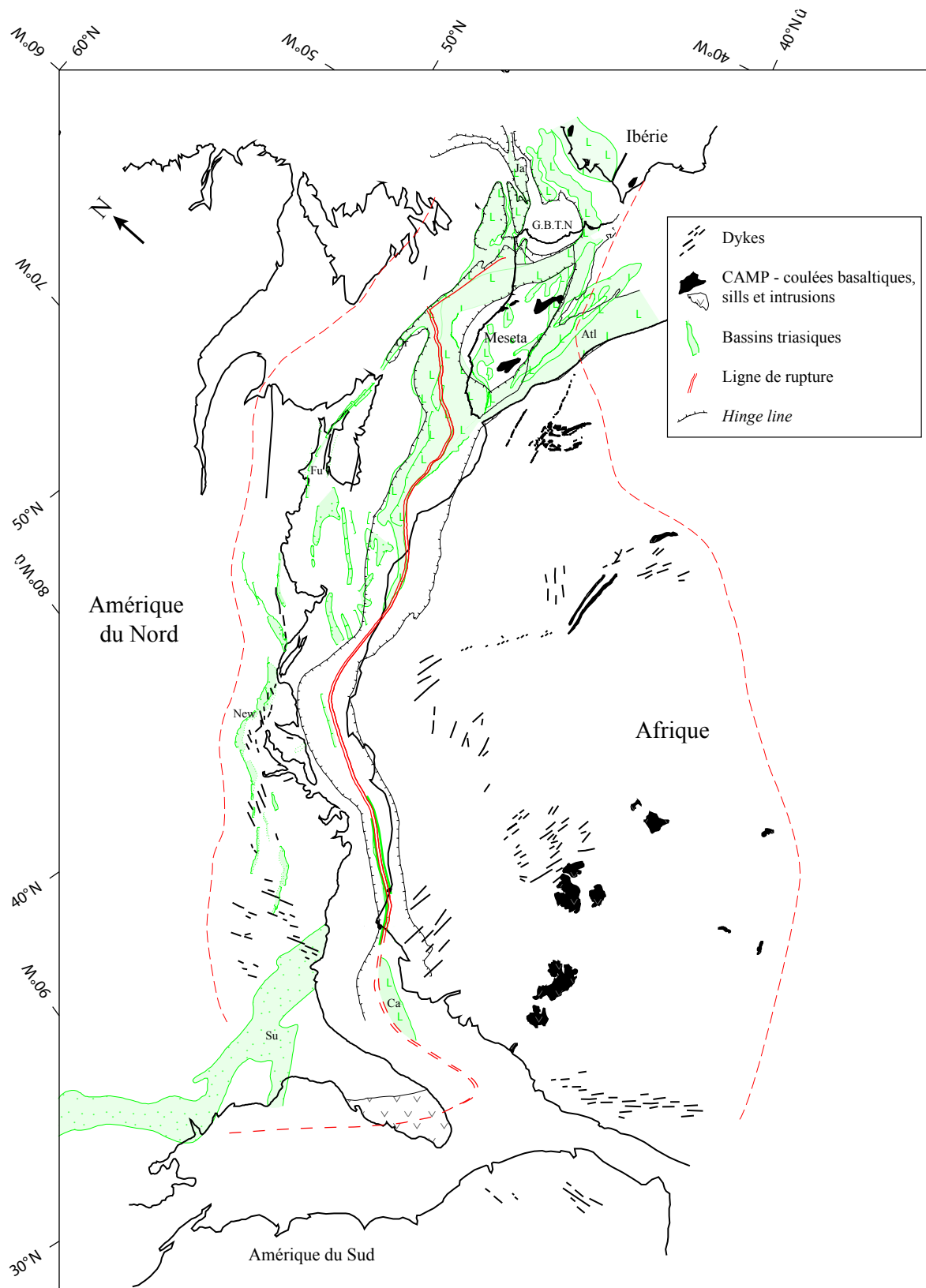


**Figure I-3** : Phase de fermeture du paléo-Atlantique au cours du Dévono-Carbonifère. Mise en modèle cinématique (Olivet, 1991, *inédit*) d'après le modèle de Arthaud and Matte (1977).





**Figure I-4 :** Dernière phase de formation de la Pangée au cours du Carbonifère-Permien. La collision entre le Gondwana et la Laurasia (Laurussia) forme la chaîne hercynienne. Mise en modèle cinématique (Olivet, 1991, *inédit*) d'après le modèle de Arthaud and Matte (1977).



**Figure I-5 :** Représentation du volcanisme et des bassins triasiques dans le domaine de l'Atlantique Central (localisation d'après Choubert *et al.*, 1968 ; Marzoli *et al.*, 1999 ; Davidson, 2005).

G.B.T.N. : Grand Banc de Terre-Neuve ; Ja : Bassin de Jeanne d'Arc ; Or : Bassin de Orpheus ; Fu : Bassin de Fundy ; New : Bassin de Newark ; Su : Bassin de Suwanee ; Atl : Bassins atlasiques ; Ca : Bassin de Casamance.

La plaque Amérique du Nord est fixe.

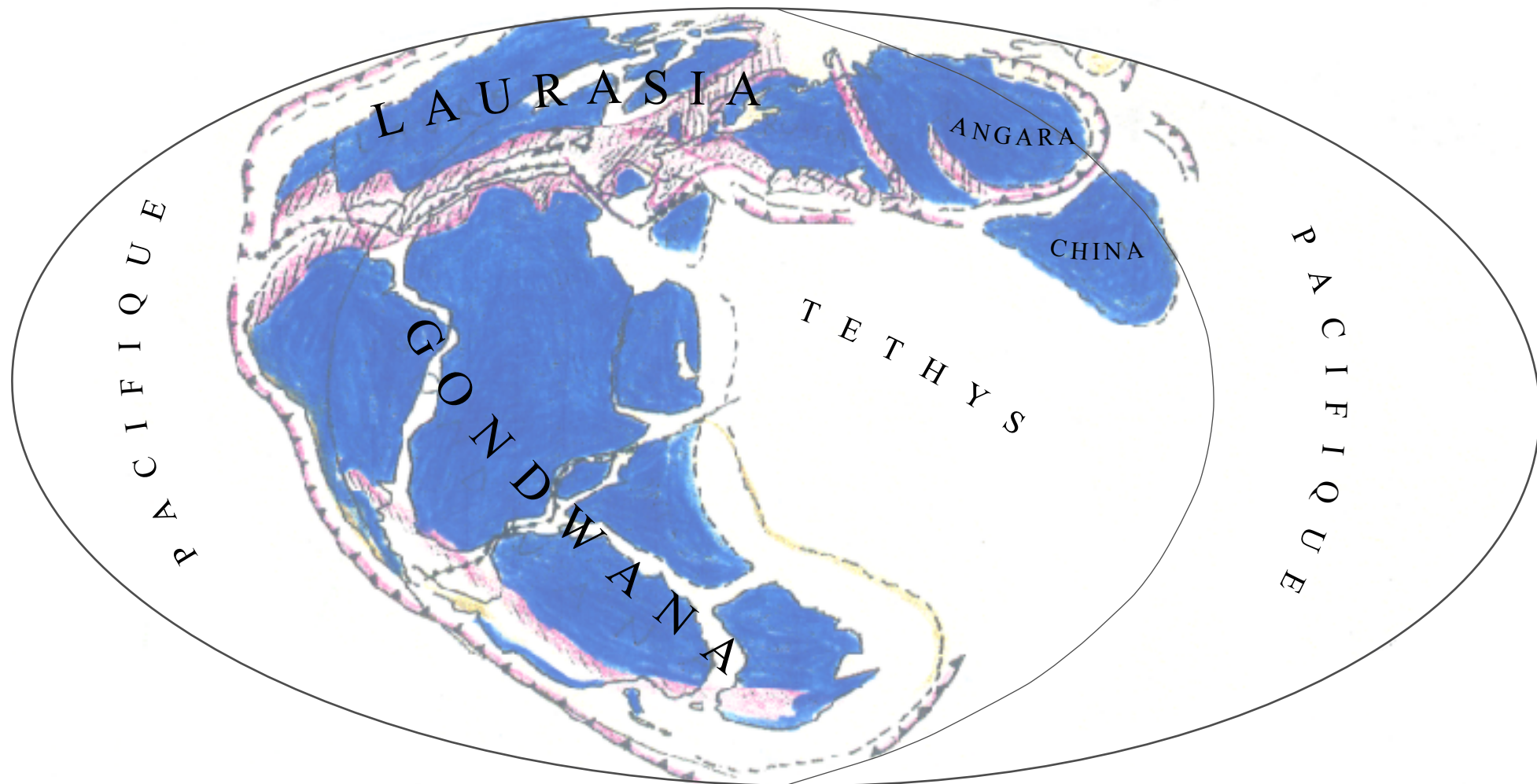
Les pôles utilisés sont :

AFR/AMN : 64.28°N 14.74°W Rot. = -78.05°

MES/AMN : 66.23°N 11.28°W Rot. = -73.91°

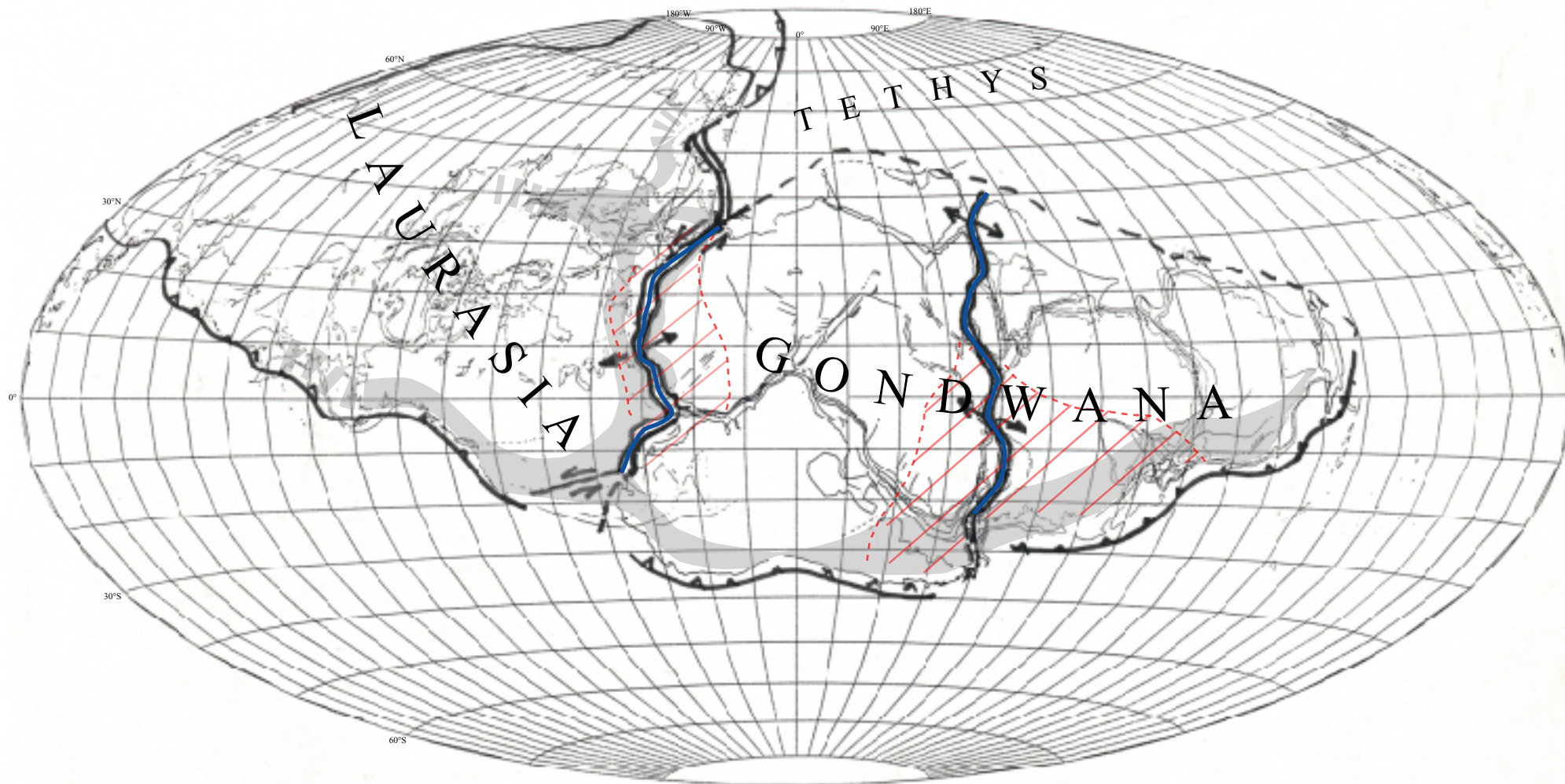
AMS/AFR : 54.27°N 34.98°W Rot. = 50.43°





**Figure I-7** : Reconstruction de la Pangée au Permo-Trias (vers 250 Ma) (Olivet, *comm. pers.*). Le color rose représente la chaîne calédonno-hercynienne. Notons que la rupture qui donne naissance au futur océan Atlantique Central suit l'orogène hercynien, celle qui ouvre une partie du futur océan Indien se situe à l'intérieur du méga-continent Gondwana.

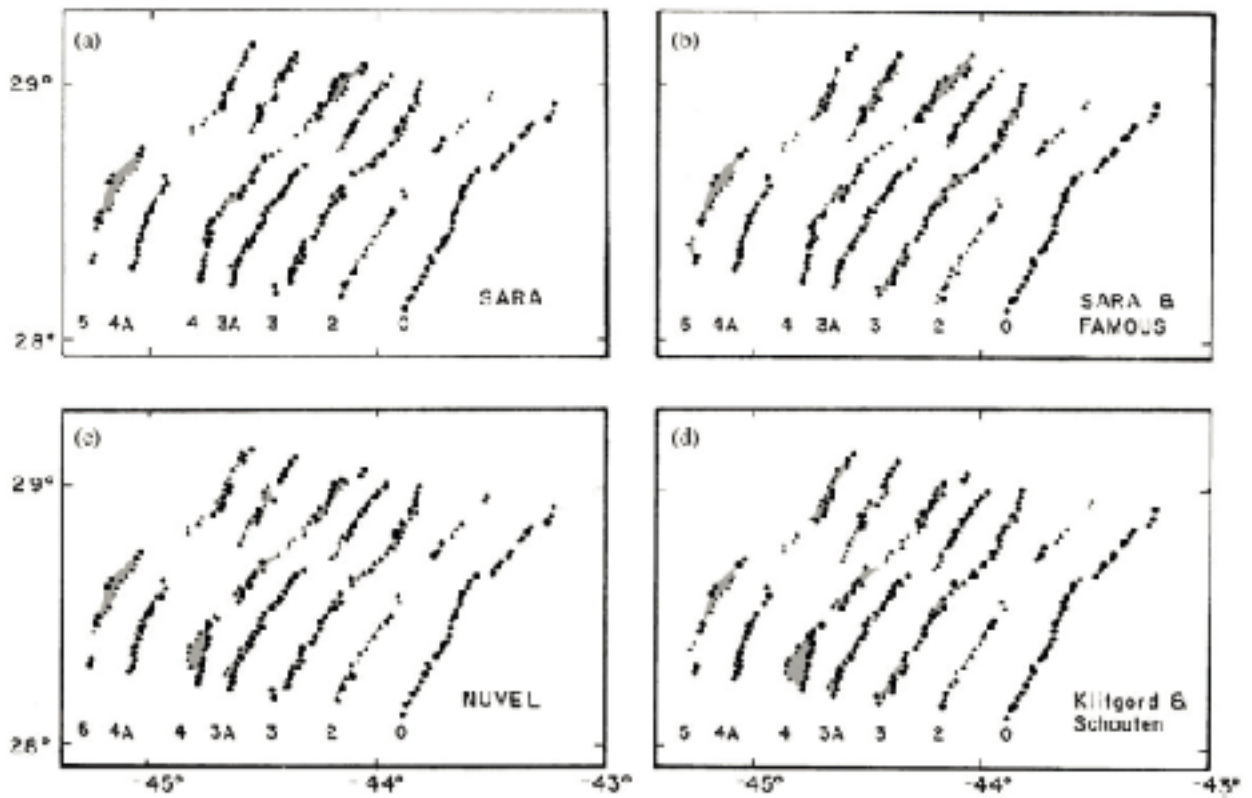




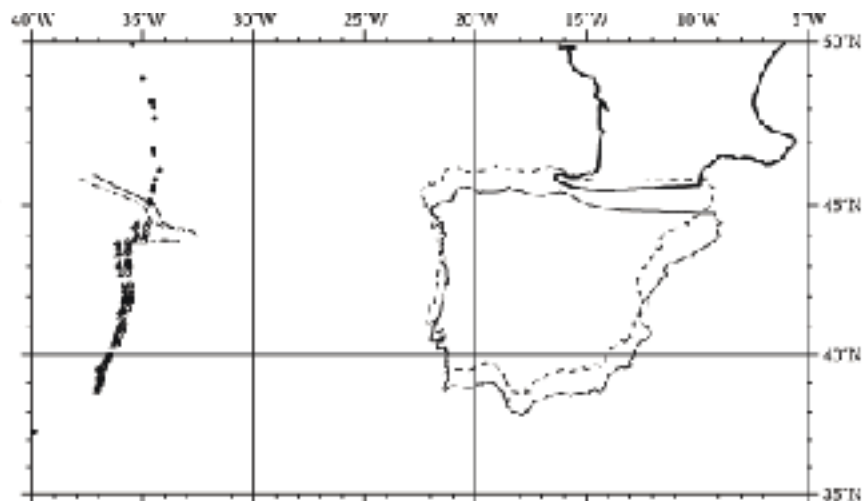
**Figure I-8 :** Reconstruction de la Pangée au Permo-Trias (vers 250 Ma) (Olivet, *comm. pers.*). La position de la Pangée a été choisie de façon à mettre en évidence le parallélisme entre les cassures (traits bleus) et les méridiens. Les traits bleus représentent les lignes de rupture de la première phase de distension intracontinentale triasico-liasique qui a donné naissance au futur océan Atlantique Central et à une partie du futur océan Indien. Les zones grisées correspondent aux chaînes paléozoïques, le trait pointillé rouge et les zones hachurées de couleur rouge marque le volcanisme associé aux phénomènes distensifs.

Chapitre II

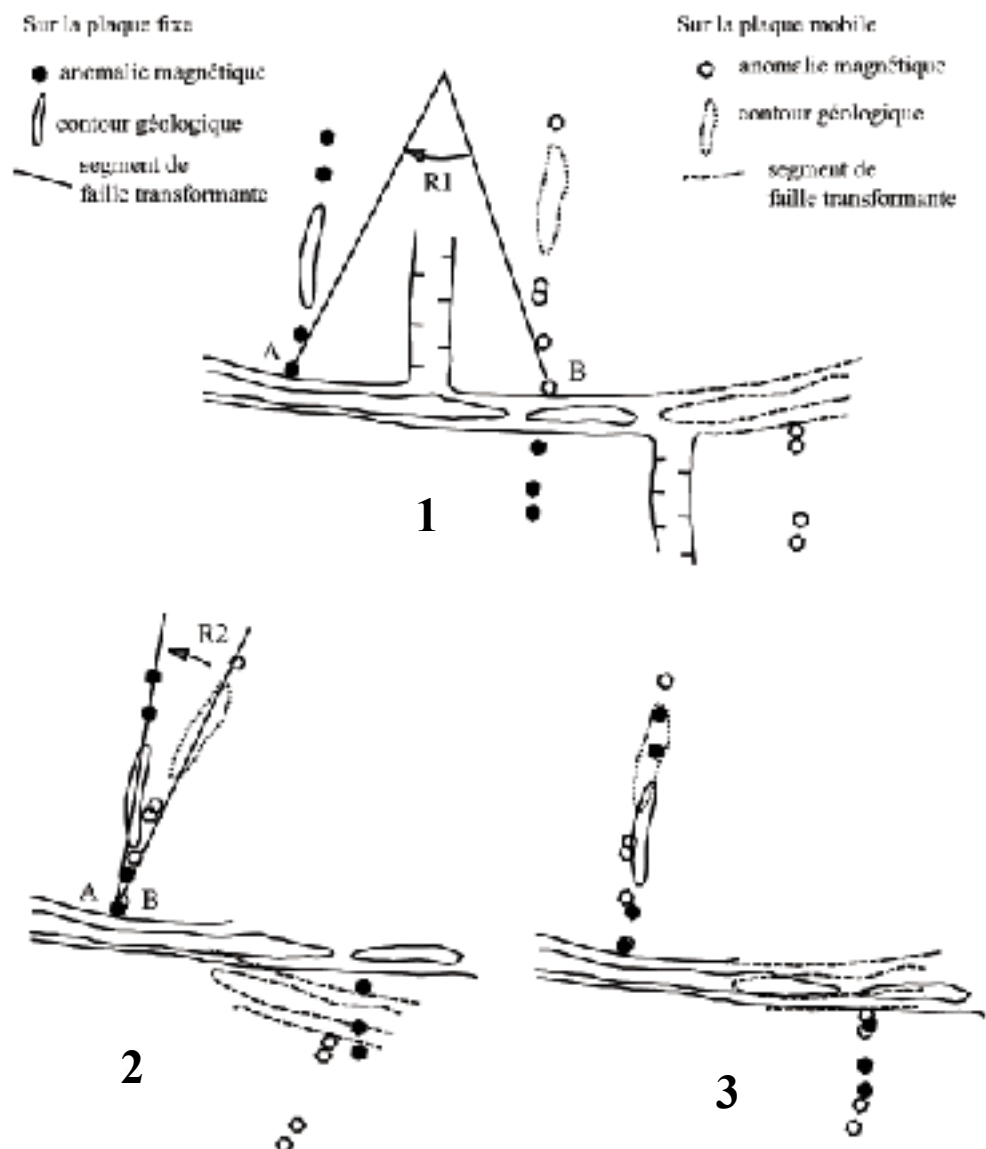
## Etude cinématique



**Figure II-1:** Illustration du manque de précision dans la superposition des anomalies magnétiques : exemple de la zone SARA, située entre les zones de fracture Atlantis et Kane (Fidalgo, 2001 d'après Sloan and Patriat, 1992). Les anomalies magnétiques du flanc oriental (triangles) sont superposées aux anomalies homologues du flanc occidental (cercles), considéré fixe. Un ensemble de pôles de rotation finie est proposé : (a) pôle calculé en utilisant les données magnétiques de la zone SARA (Sloan and Patriat, 1992); (b) pôle obtenu en combinant les données magnétiques des zones SARA et FAMOUS (Sloan and Patriat, 1992); (c) pôle estimé à partir du modèle NUVEL-1 (DeMets *et al.*, 1990) pour l'anomalie C2A; (d) pôle calculé à partir du pôle de Klitgord and Schouten (1986) pour l'anomalie C5. Notons que chacune des reconstitutions présentent des hiatus et des recouvrements (zones en gris), mais leur extension est constante (inférieure à 10 km).



**Figure II-2:** Présentation de deux solutions possibles pour la reconstitution de la plaque Ibérie à l'anomalie C21 obtenues par un assemblage virtuel (Matias *et al.*, 2005). Les points noirs représentent l'anomalie magnétique C21 sur la plaque Amérique du Nord. Le contour, en trait épais continu, correspond à l'Europe, considérée fixe. Le contour, en trait pointillé fin, représente la position de la plaque Ibérie et les cercles ouverts, l'anomalie C21, rotés avec le pôle (77.99°N, 115.07°E, -11.42°), tandis que le contour, en trait continu, et les triangles sont rotés en utilisant le pôle (63.23°N, 131.88°E, -10.55°). Ces reconstitutions montrent deux approches; un pôle de rotation assemble correctement les anomalies du segment Sud, tandis qu'un autre superpose celles situées sur le segment Nord. Cette figure montre que l'utilisation unique des données de magnétisme ne permet pas de choisir entre ces deux propositions de pôle de rotation.

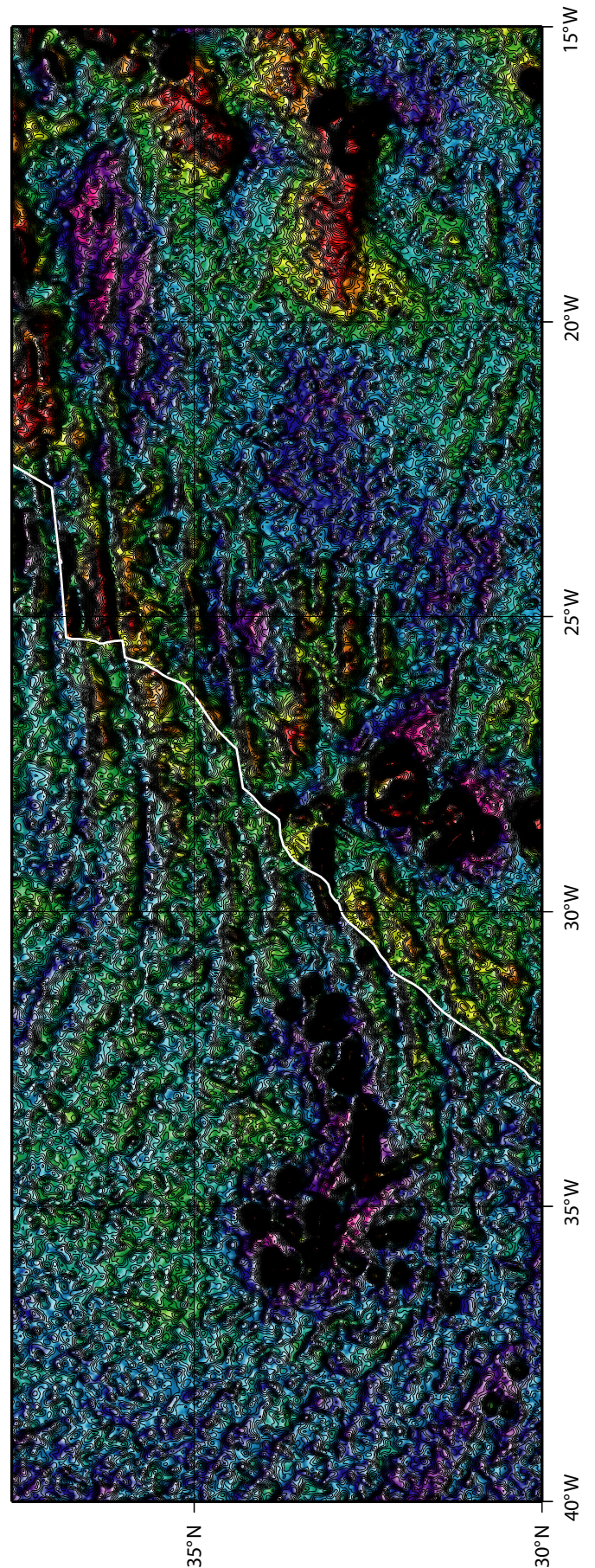
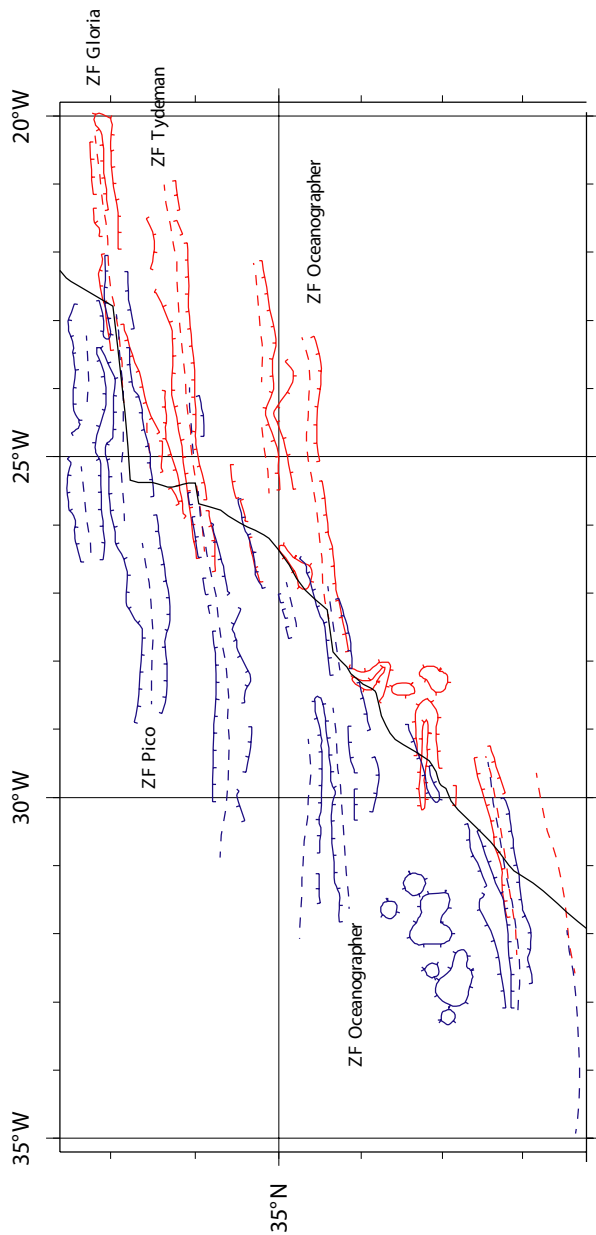


**Figure II-3 :** Méthode de reconstitution à partir des points homologues de Olivet (1978) et de Bonnin (1978).

Soient deux points A et B supposés de même âge et qui appartiennent à deux plaques et deux structures géologiques homologues. La rotation R, à appliquer pour replacer ces deux points à leur position initiale, peut se décomposer en deux rotations successives :

1. la rotation R1 amène le point B sur le point A,
2. la rotation R2, dont le pôle se situe géographiquement en A, amène les contours en superposition. L'angle R2 est déterminé de façon visuelle en appréciant la superposition du magnétisme et/ou de toute structure homologue concernée.



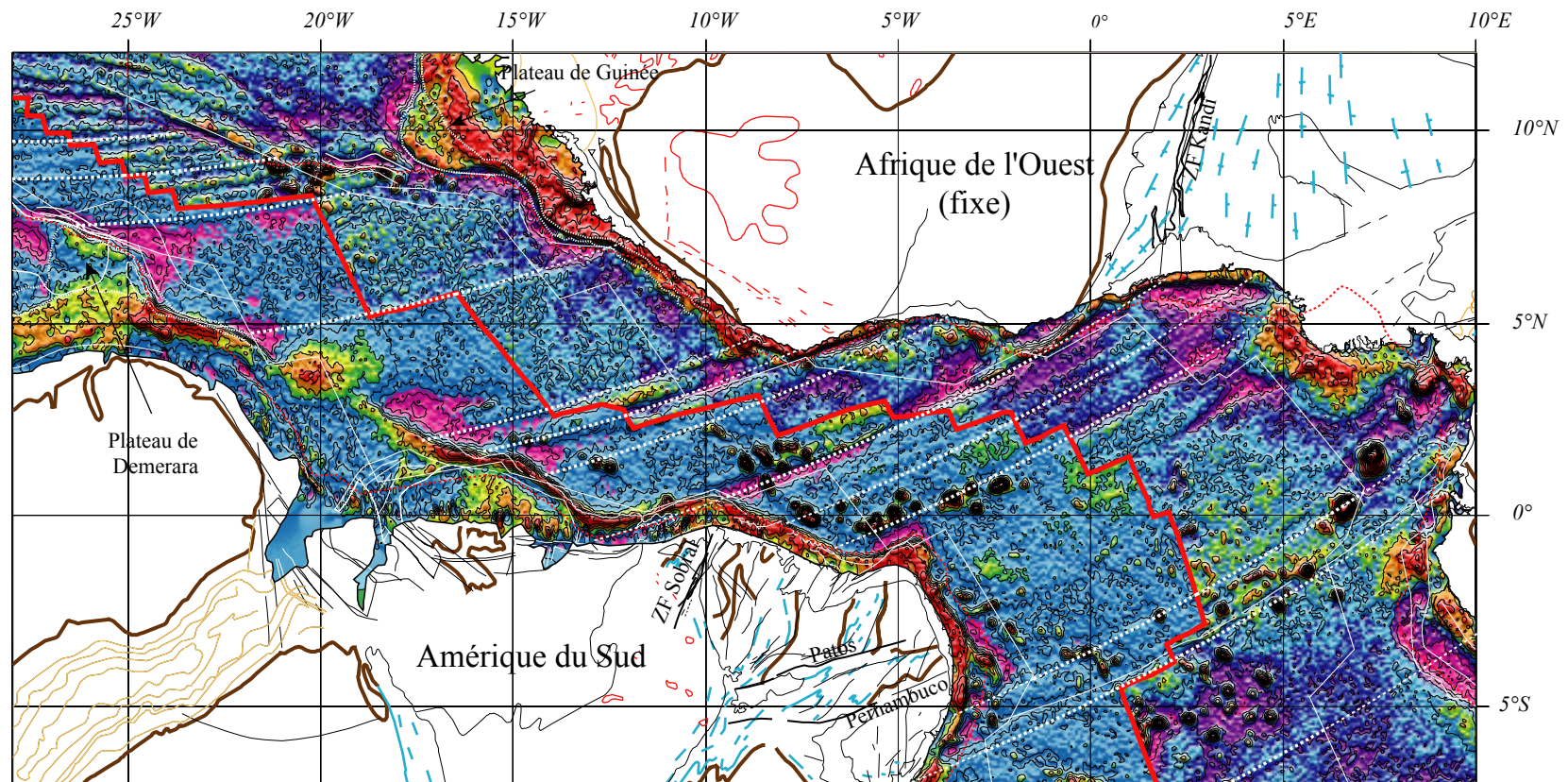


**Figure II-4 :** La précision des zones de fracture comme contrainte dans l'agencement cinématique : l'exemple de la reconstitution entre les plaques africaine et nord-américaine à l'anomalie C25 (Fidalgo, 2001).

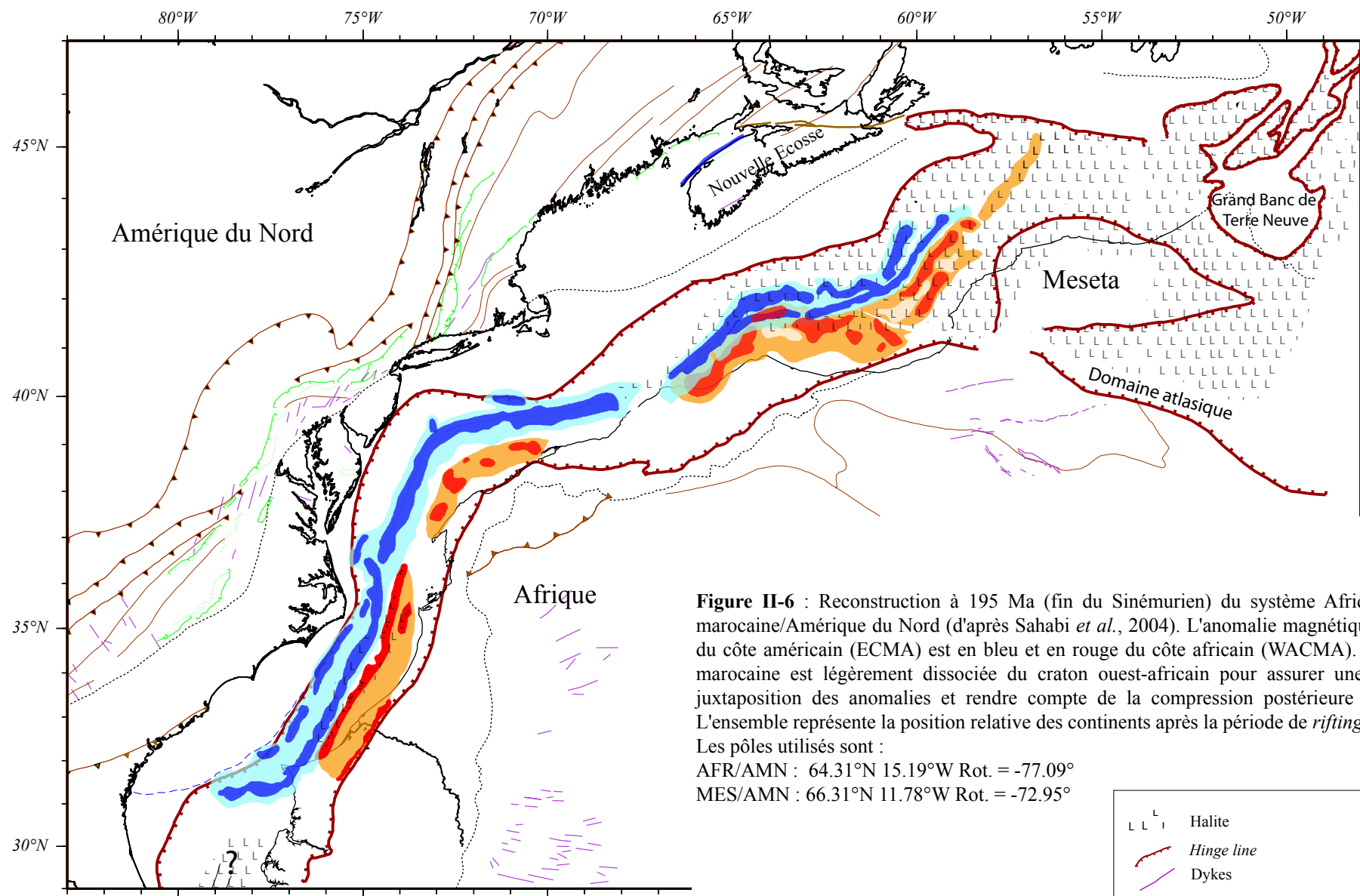
La grille gravimétrique (1 min\*1 min) de Sandwell and Smith (1997) a été découpée en suivant l'isochrone C25 sur chacune des plaques. La plaque Afrique est en position fixe, la plaque Amérique est rotée.

Ces figures montrent en détail à quel point les zones de fracture déduites des données altimétriques permettent de contraindre une reconstitution cinématique. Au Nord, la zone de fracture Gloria correspond à une partie du tracé de la frontière de plaques entre l'Ibérie et l'Afrique. C'est une région qui a subi des phénomènes de déformation. Néanmoins, même au niveau de ces zones de fracture septentrionales (les zones de fracture Pico du côté américain et Gloria du côté africain) l'ajustement est remarquable.





**Figure II-5** : Reconstitution dans l'océan Atlantique Equatorial, à l'anomalie C34 (Moulin *et al.*, 2005b). La grille gravimétrique (1 min\*1 min) de Sandwell and Smith (1997) a été découpée le long de l'isochrone C34 sur chacune des plaques. La plaque Afrique est en position fixe et la plaque Amérique du Sud est rotée. Cette reconstitution est bien contrainte par l'anomalie magnétique et les zones de fracture. Le trait épais rouge représente l'axe d'accrétion à cette époque. Les traits en pointillé fin rouge correspondent à la position du *fit* sur les deux plaques. Les traits en pointillé fin blanc marquent la trajectoire des petits cercles calculés à partir du pôle de Campan (1995) pour décrire le mouvement relatif des plaques entre l'anomalie C34 et 105 Ma. Notons l'ajustement remarquable entre ces petits cercles et les zones de fracture.

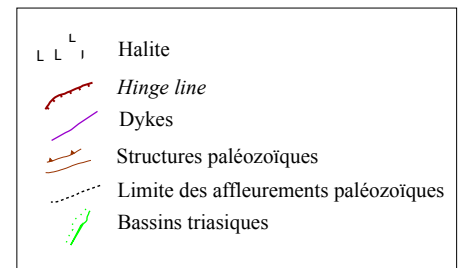


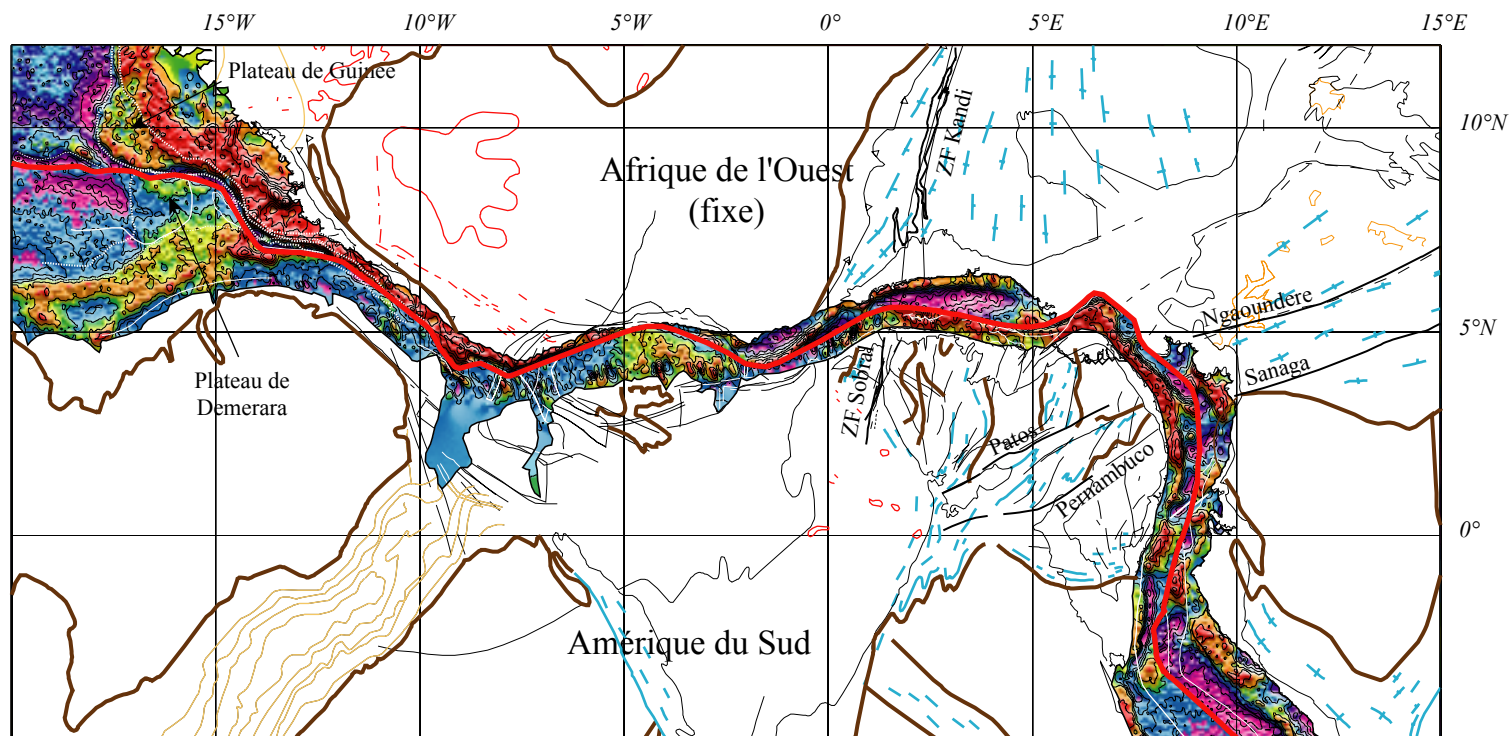
**Figure II-6** : Reconstruction à 195 Ma (fin du Sinémurien) du système Afrique/Meseta marocaine/Amérique du Nord (d'après Sahabi *et al.*, 2004). L'anomalie magnétique bordière du côté américain (ECMA) est en bleu et en rouge du côté africain (WACMA). La Meseta marocaine est légèrement dissociée du craton ouest-africain pour assurer une meilleure juxtaposition des anomalies et rendre compte de la compression postérieure de l'Atlas. L'ensemble représente la position relative des continents après la période de *rifting*.

Les pôles utilisés sont :

AFR/AMN : 64.31°N 15.19°W Rot. = -77.09°

MES/AMN : 66.31°N 11.78°W Rot. = -72.95°



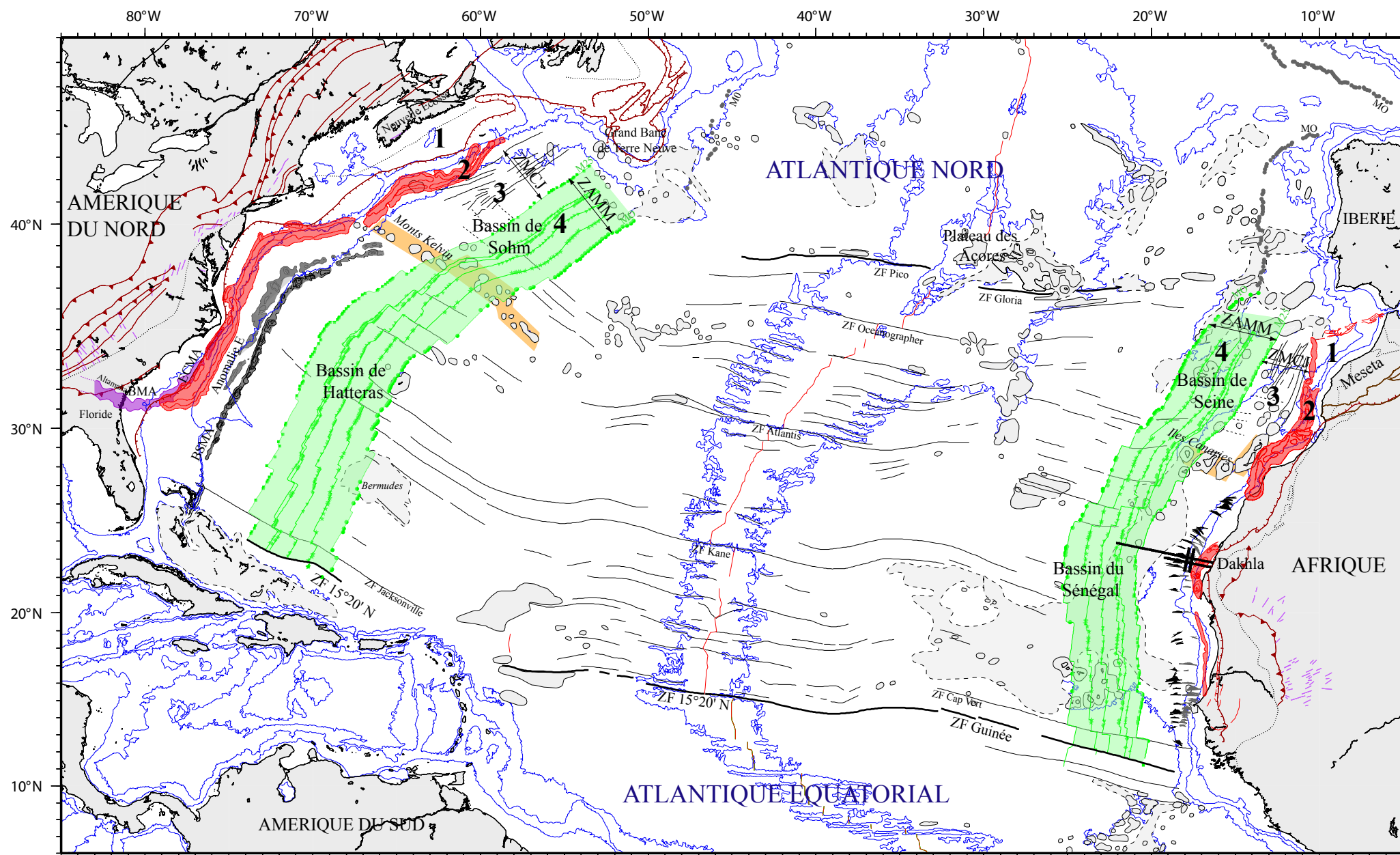


**Figure II-7** : Reconstitution initiale dans l'océan Atlantique Equatorial (Moulin *et al.*, 2005b). Cette reconstitution a été obtenue en faisant coulisser la plaque Amérique le long des petits cercles calculés à partir du pôle de Campan C34-105Ma (voir la figure II-5). Le glissement le long de ces "rails" a été arrêté lorsque les plateaux de Guinée et de Demerara se juxtaposaient et que les linéaments de Kandi et de Sobral étaient alignés.

La grille gravimétrique (1 min\*1 min) de Sandwell and Smith (1997) a été découpée selon l'ajustement initial (trait épais rouge) sur chacune des plaques envisagées.

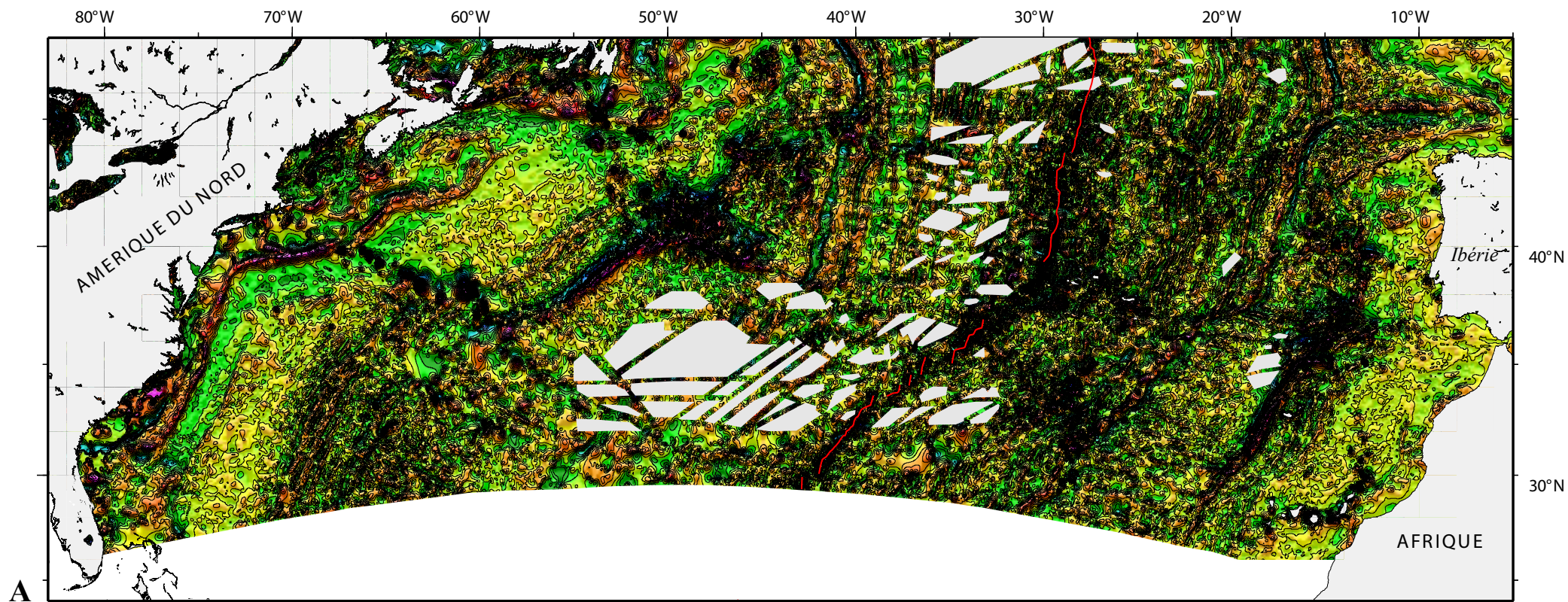
Noter la position remarquable des structures homologues : les plateaux de Guinée et de Demerara, les linéaments précambriens de Kandi et de Sobral.





**Figure II-8 :** L'Atlantique Central, situé entre les zones de fracture Pico et Gloria, au Nord, et les zones de fracture 15°20'N et Guinée, au Sud. Les contours bathymétriques 200 m, 2000 m et 4000 m sont figurés en bleu. Les zones colorées correspondent aux données magnétiques étudiées dans ce travail : en rouge, les anomalies bordières ECMA (East Coast Magnetic Anomaly) et WACMA (West African Coast Magnetic Anomaly) et son extension vers le Nord, l'anomalie S'. En gris et en noir, les anomalies dans la Zone Magnétique Calme du Jurassique, et en vert, les anomalies dans la Zone des Anomalies Magnétiques Mésozoïques.



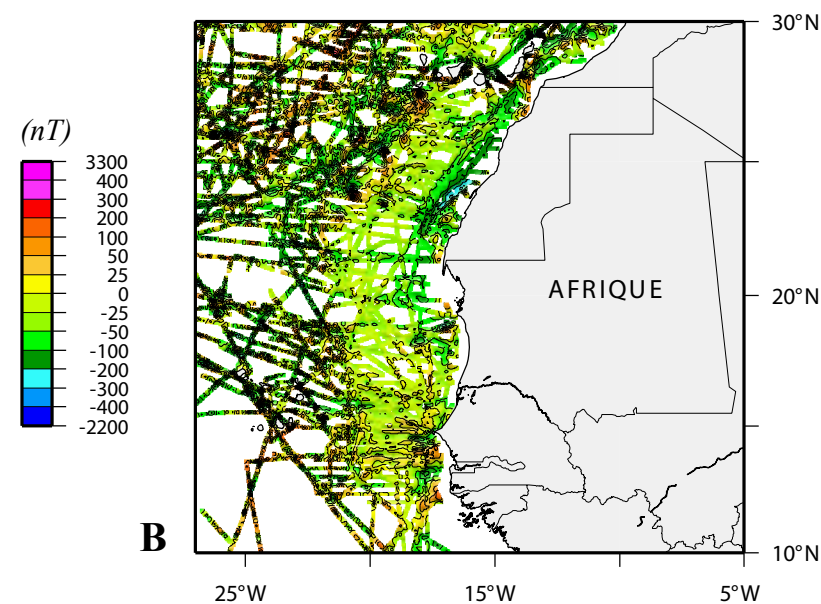


**Figure II-9 :** La carte des anomalies magnétiques contourées de l'Atlantique Central.

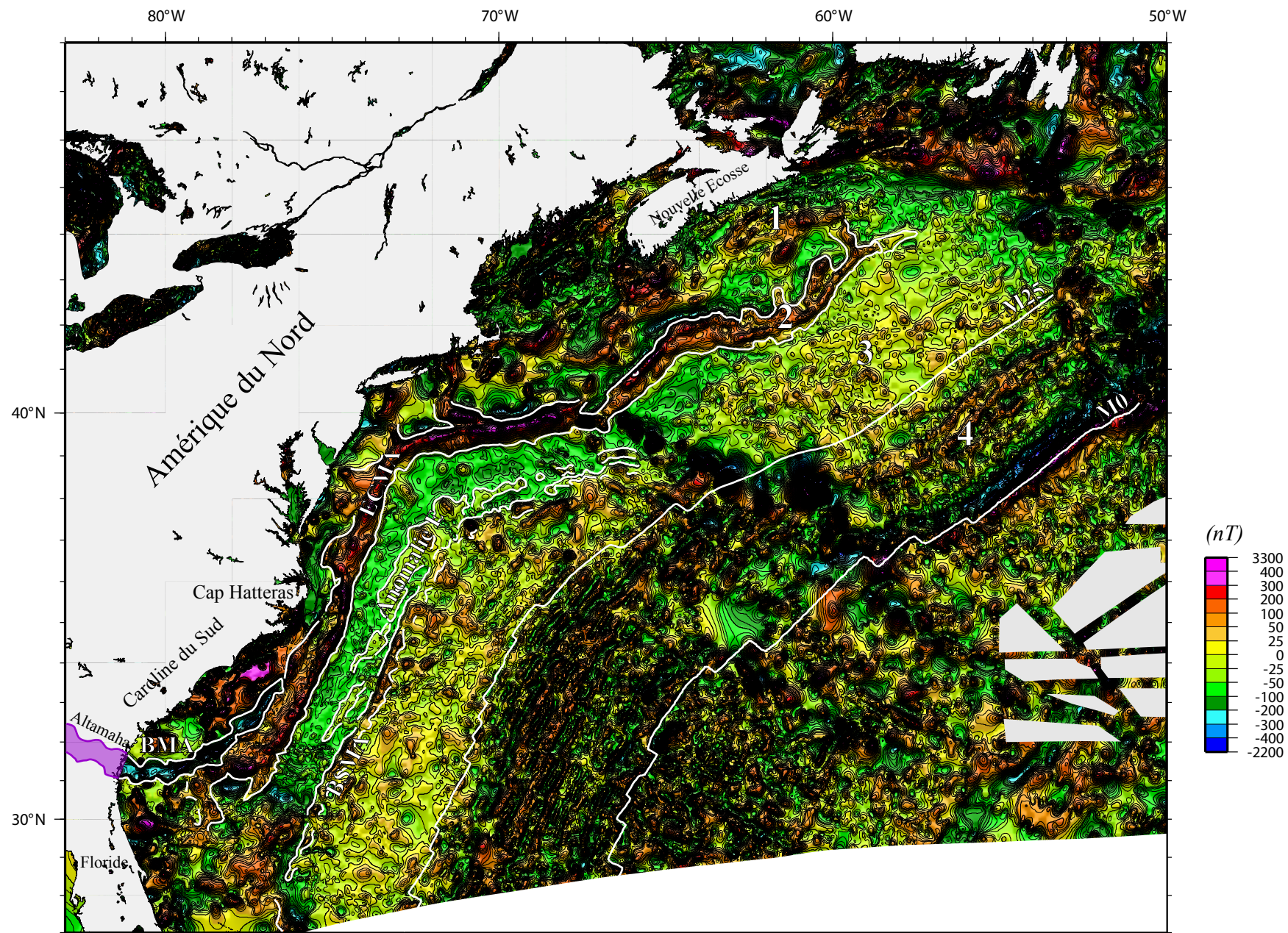
La figure A est réalisée à partir des données de Verhoef *et al.* (1996). Le trait épais rouge représente la dorsale médio-océanique. Les zones en gris clair sont des caches pour signaler les zones non-échantillonnées.

La figure B est la grille magnétique réalisée à partir des profils magnétiques provenant de Geodas, complétés par des données propres à Ifremer et des communications personnelles de Roeser et Van der Linden.

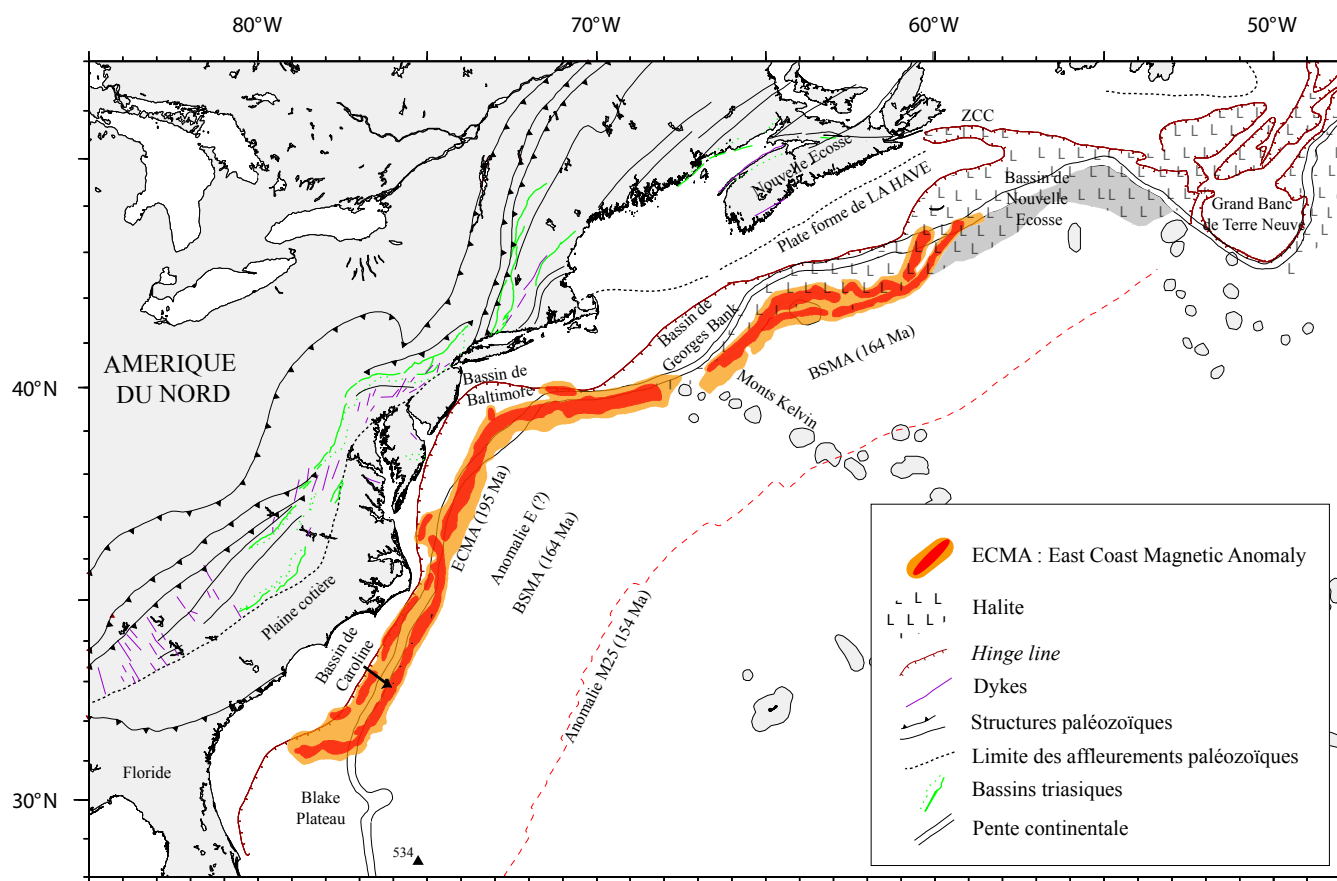
L'équidistance des isocontours sur chacune des cartes est de 20 nT.



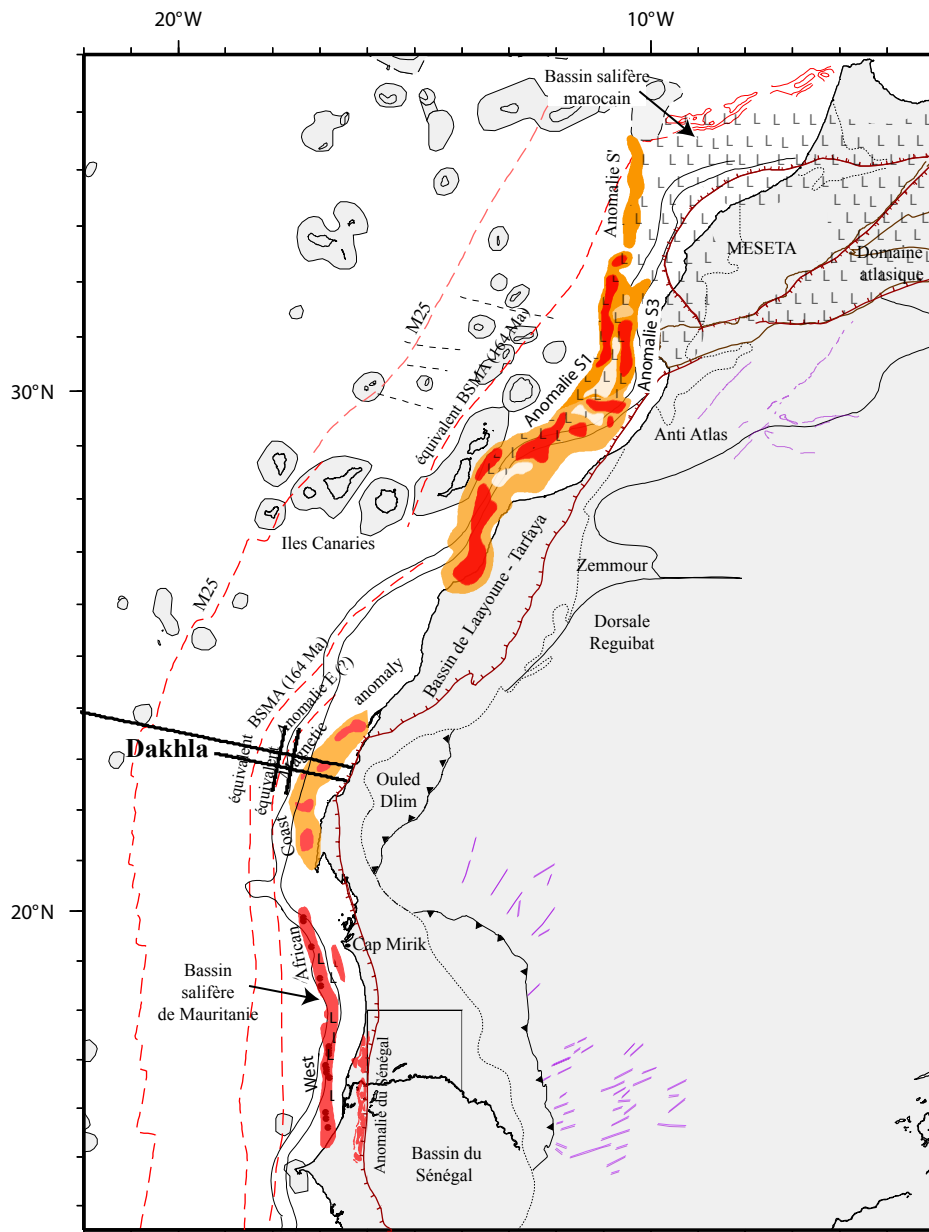




**Figure II-10 :** Carte des anomalies magnétiques contourées de la marge est américaine, issues de la grille magnétique de Verhoef *et al.* (1996). Les traits épais blancs marquent les contours des anomalies BMA, ECMA, anomalie E et BSMA, les isochrones M25 et M0. Les différents domaines magnétiques 1, 2, 3 et 4 sont décrits dans le texte. Les zones grisées marquent les zones non-échantillonnées. L'équidistance des isocontours est de 20 nT. La projection de la carte est en Mercator.

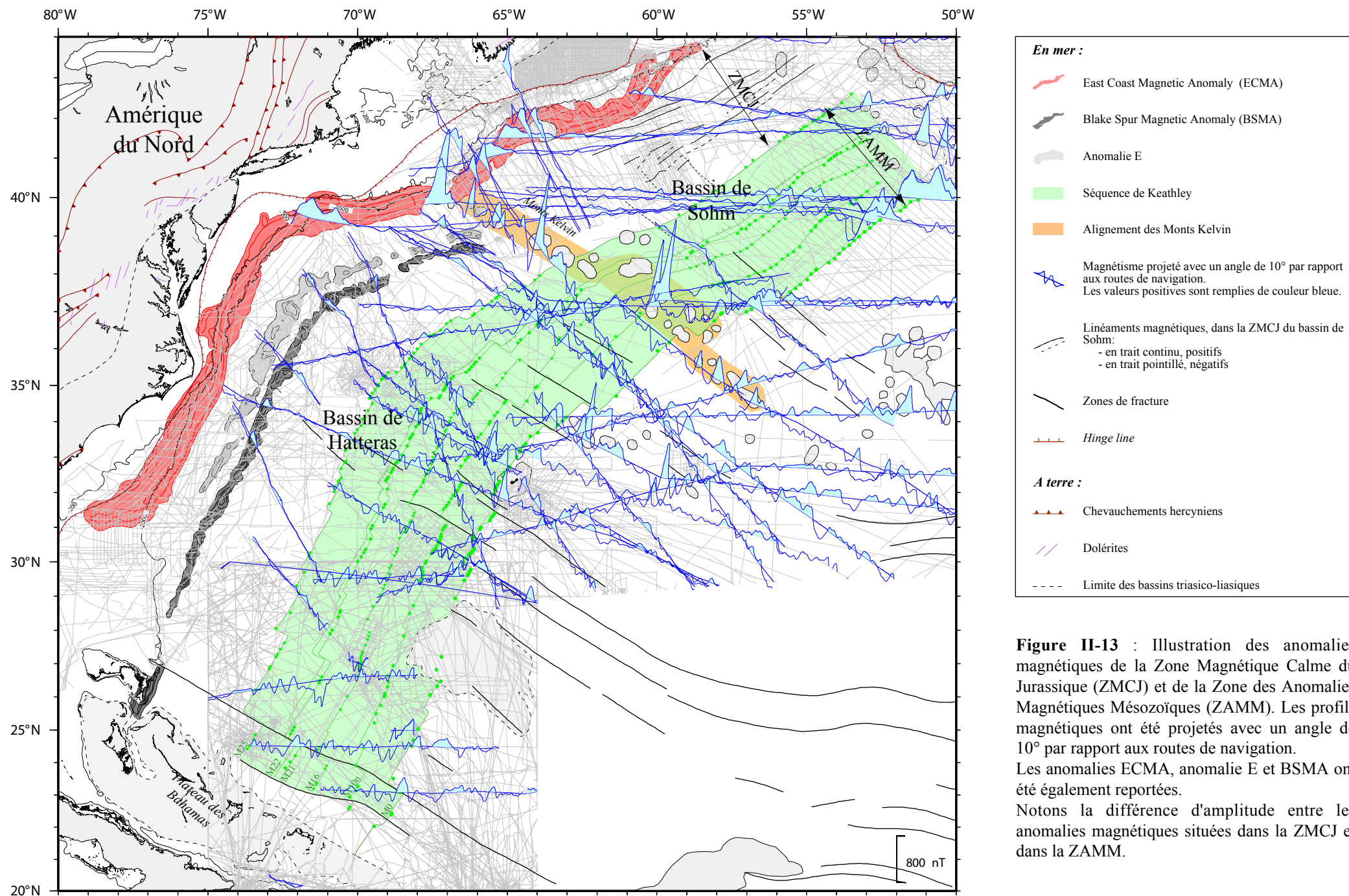


**Figure II-11** : Carte générale de la marge est américaine (Sahabi *et al.*, 2004). La East Coast Magnetic Anomaly (ECMA) a été représentée en deux tons, en fonction de sa forme et de son amplitude, à partir de la carte de Verhoef *et al.* (1996). Le bassin de Caroline est situé à l'aplomb de la partie externe de la ECMA. Les autres bassins (Baltimore, Georges Bank et Nouvelle Ecosse) se situent dans des rentrants de la *hinge line* par rapport à la ECMA. L'âge indiqué (195 Ma) correspond approximativement à la première croûte océanique adjacente à cette anomalie (Sahabi *et al.*, 2004). Les affleurements volcaniques (dykes) reportés d'après Sheridan *et al.* (1988) appartiennent à la province magmatique de l'Atlantique Central (CAMP). La carte montre également la répartition des dépôts de halite avec, en grisé, l'extension d'un glissement post-ouverture océanique (Sahabi *et al.*, 2004). L'anomalie E est la première anomalie magnétique notable à partir de la marge. Le forage DSDP 534 qui a permis de dater la BSMA est indiqué.

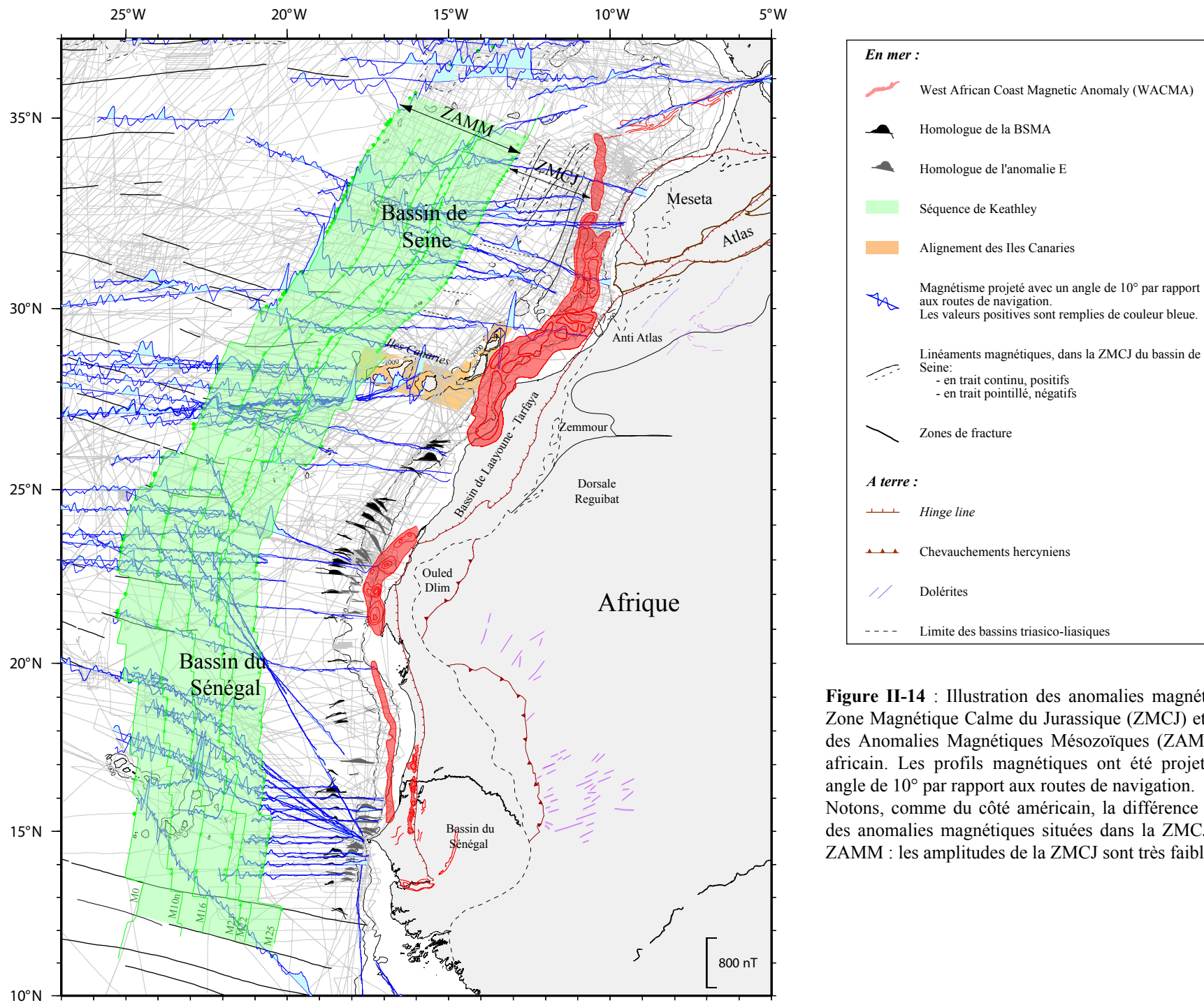


**Figure II-12 :** Structures de la marge nord-ouest africaine (mêmes conventions que pour la figure II-11) (Sahabi *et al.*, 2004). L'anomalie magnétique ouest-africaine (WACMA) se présente en trois segments : le segment septentrional (anomalies S1 et S3) est schématisé à partir de la carte de Verhoef *et al.* (1996) et les travaux de Roeser (1982) et de Sahabi *et al.* (2004) ; au centre, le contour de l'anomalie provient des données magnétiques pétrolières (*comm. pers.*) ; au Sud, l'anomalie continentale du Sénégal (Liger, 1980) a été complétée par des données en mer (Sahabi *et al.*, 2004). Noter le segment S' qui prolonge au Nord l'anomalie S1 et marque la limite des évaporites du bassin marocain profond. Sur la Meseta, est reportée l'extension maximale probable de la halite au Lias inférieur d'après Le Roy and Piqué (2001). Noter la présence d'un bassin à évaporites étroit à l'aplomb de la partie externe de la WACMA en regard de la Mauritanie. Les dykes représentatifs de la Province Magmatique de l'Atlantique Central (CAMP) sont indiqués d'après Bertrand and Westphal (1977).



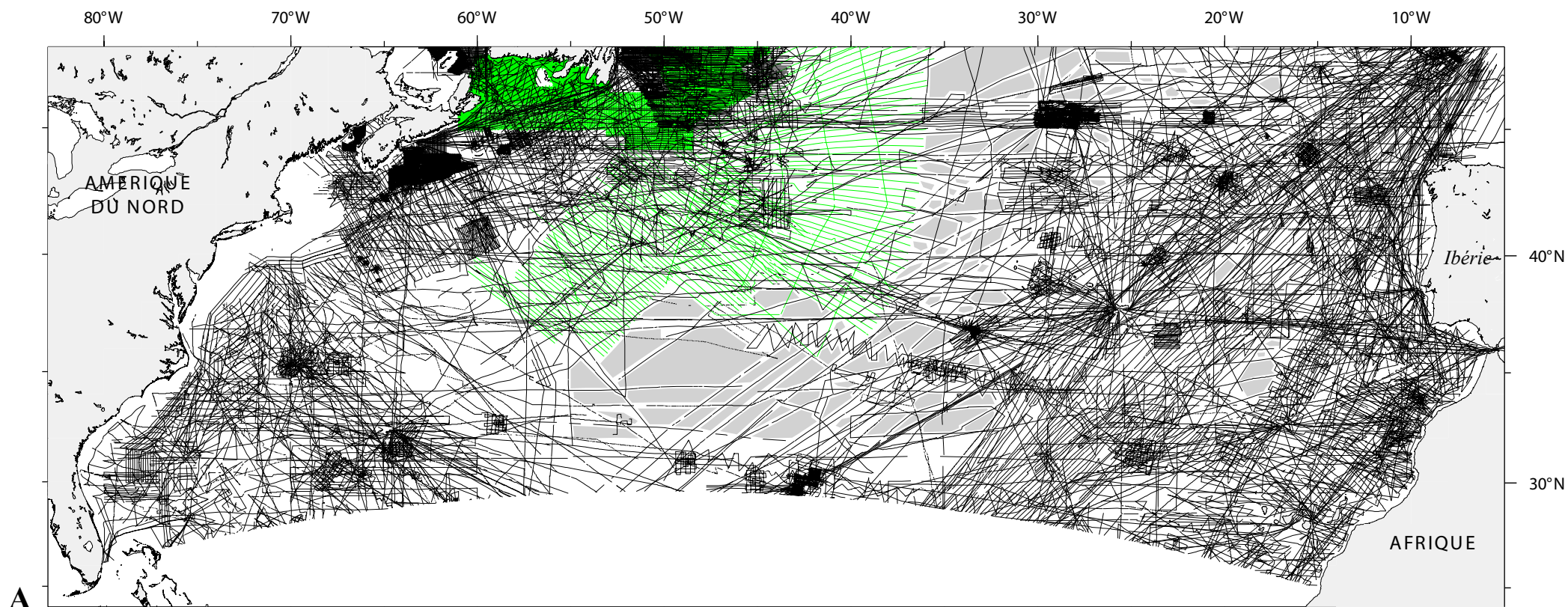


**Figure II-13** : Illustration des anomalies magnétiques de la Zone Magnétique Calme du Jurassique (ZMCJ) et de la Zone des Anomalies Magnétiques Mésozoïques (ZAMM). Les profils magnétiques ont été projetés avec un angle de 10° par rapport aux routes de navigation. Les anomalies ECMA, anomalie E et BSMA ont été également reportées. Notons la différence d'amplitude entre les anomalies magnétiques situées dans la ZMCJ et dans la ZAMM.



**Figure II-14 :** Illustration des anomalies magnétiques de la Zone Magnétique Calme du Jurassique (ZMCJ) et de la Zone des Anomalies Magnétiques Mésozoïques (ZAMM) du côté africain. Les profils magnétiques ont été projetés avec un angle de  $10^\circ$  par rapport aux routes de navigation. Notons, comme du côté américain, la différence d'amplitude des anomalies magnétiques situées dans la ZMCJ et dans la ZAMM : les amplitudes de la ZMCJ sont très faibles.

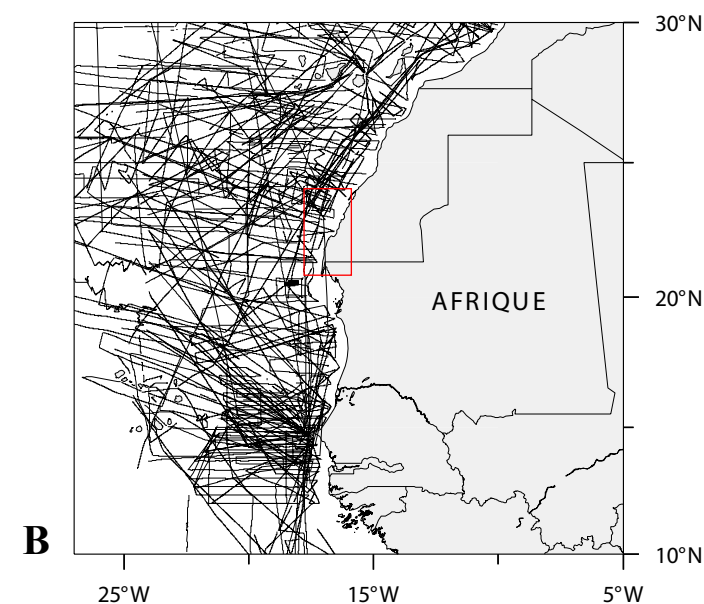




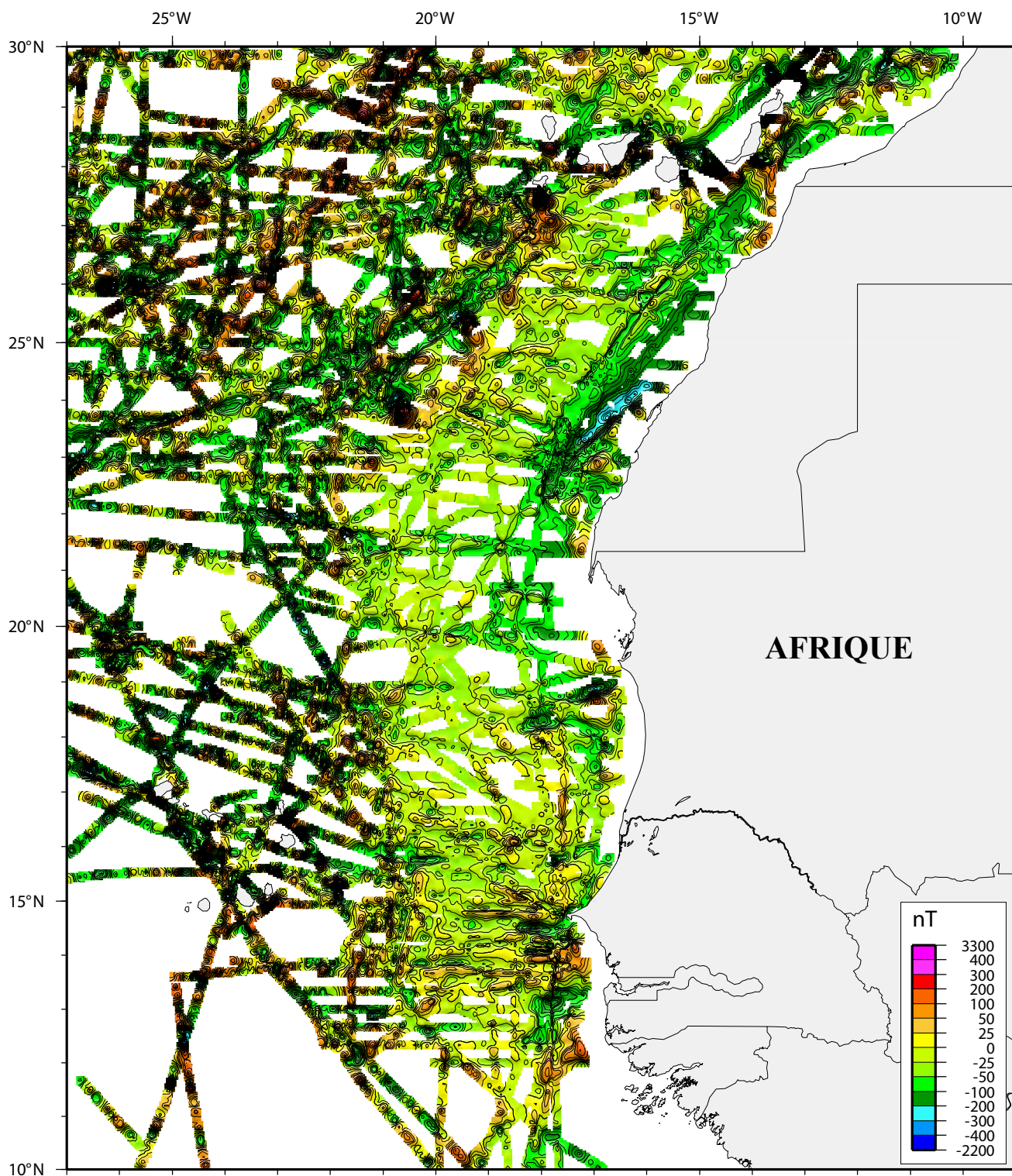
**Figure II-15 :** La couverture magnétique de l'Atlantique Central, pour les données de la carte de Verhoef *et al.* (1996) (A) et notre compilation de données au large de l'Afrique de l'Ouest (B). Le cadre rouge indique les données fournies par Total qui nous ont servi à faire le contourage du segment central de la WACMA. Elles restent confidentielles et n'ont donc pas été incluses pour réaliser la carte magnétique.

Ces cartes montrent la quantité variable de l'ensemble de données, les zones grisées correspondent aux zones non-échantillonnées.

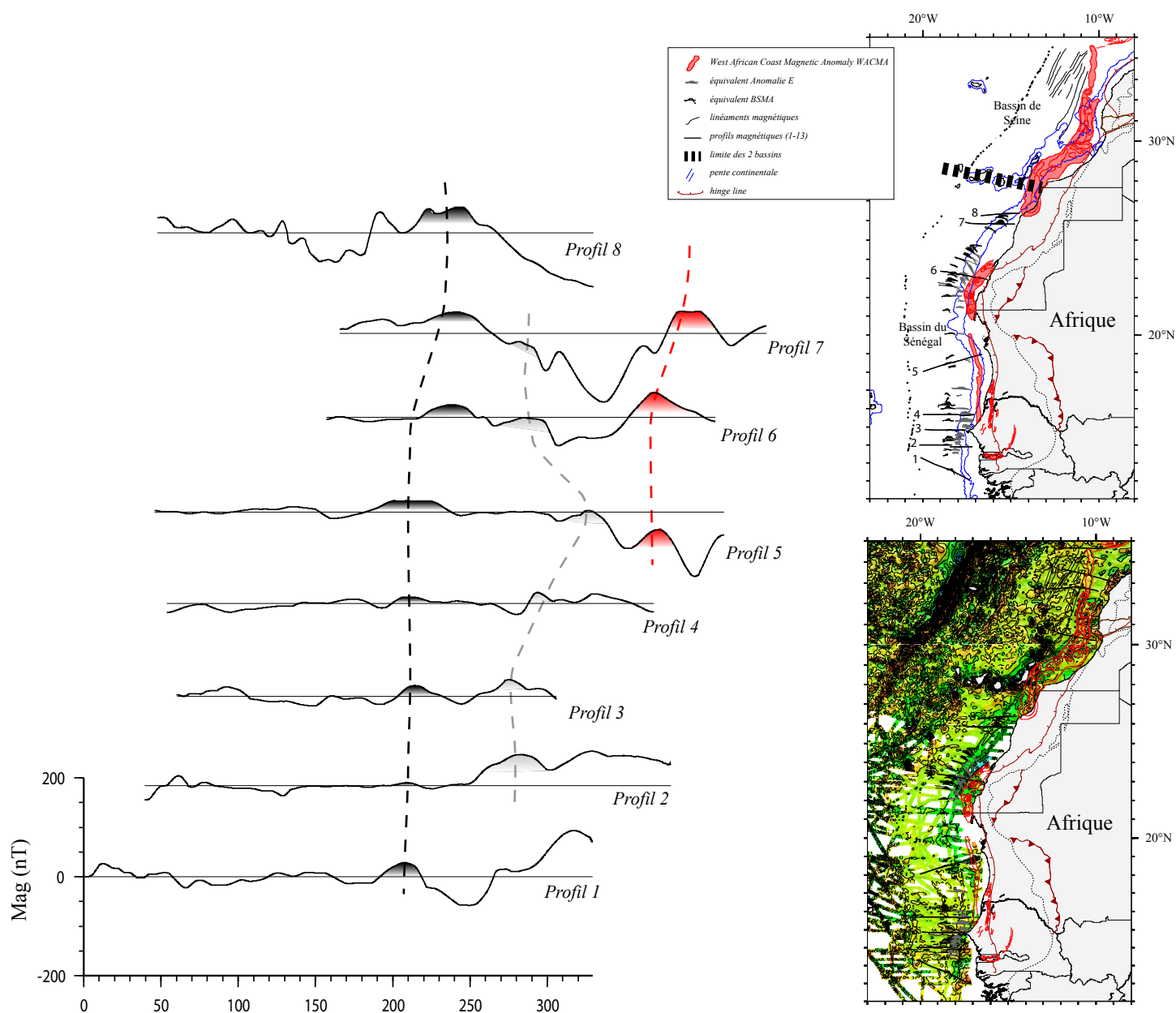
Les profils aéromagnétiques sont représentés en vert, et les profils bateau en noir.







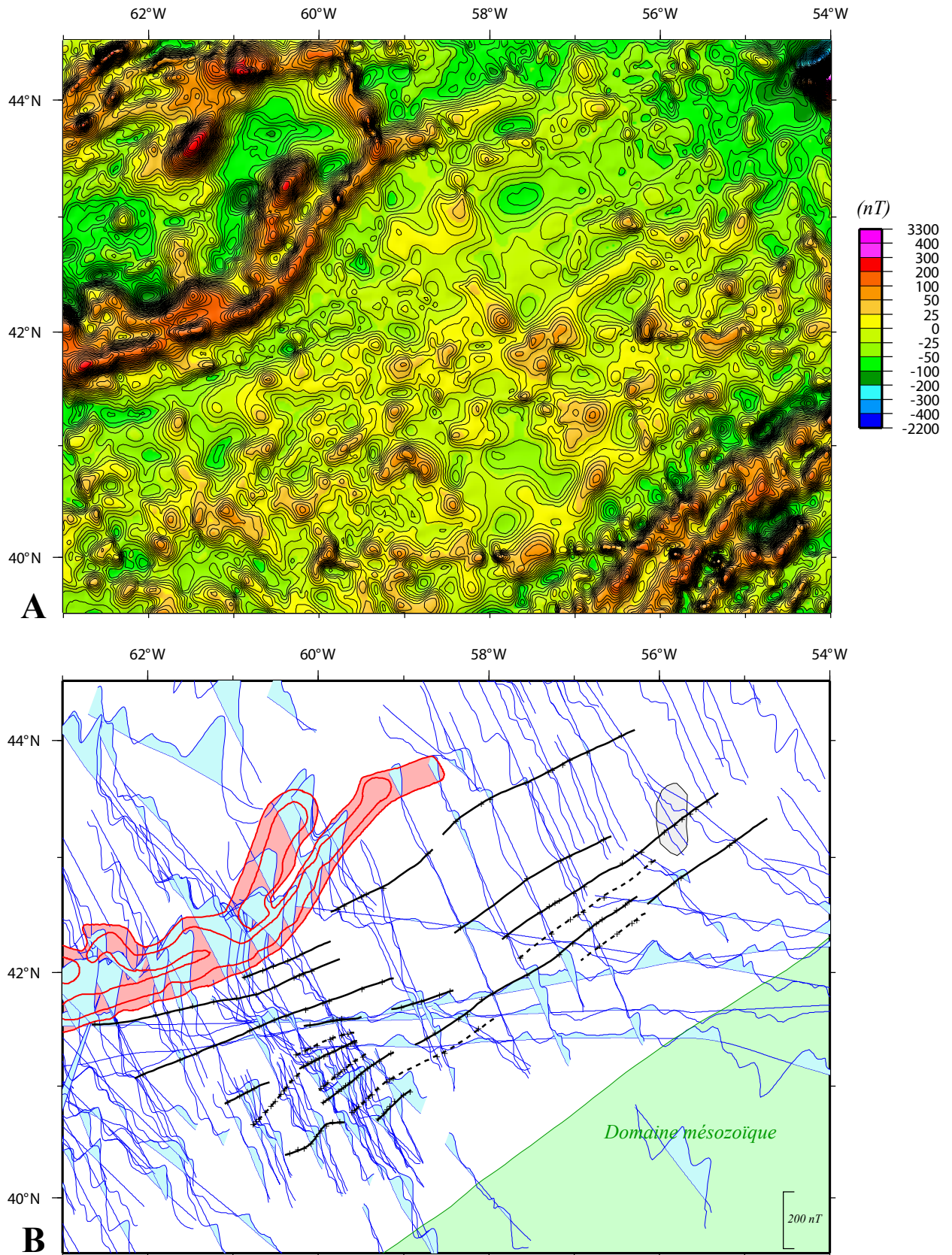
**Figure II-16** : Carte des anomalies magnétiques contourées de la marge africaine, réalisée à partir d'une compilation de données (base de données Geodas, données Ifremer, communications personnelles de Roeser et de Van der Linden). L'équidistance des isocontours est de 20 nT. La projection de la carte est en Mercator. Cette grille n'est pas une version définitive, il reste encore à faire des traitements complémentaires pour éliminer certains problèmes comme les écarts de valeurs au niveau des points de croisement par exemple.



**Figure II-17** : Quelques exemples de profils magnétiques, issus de la base de données Geodas, utilisés pour l'interprétation des anomalies magnétiques homologues à l'anomalie E et à la BSMA sur la marge africaine, dans le bassin du Sénégal.

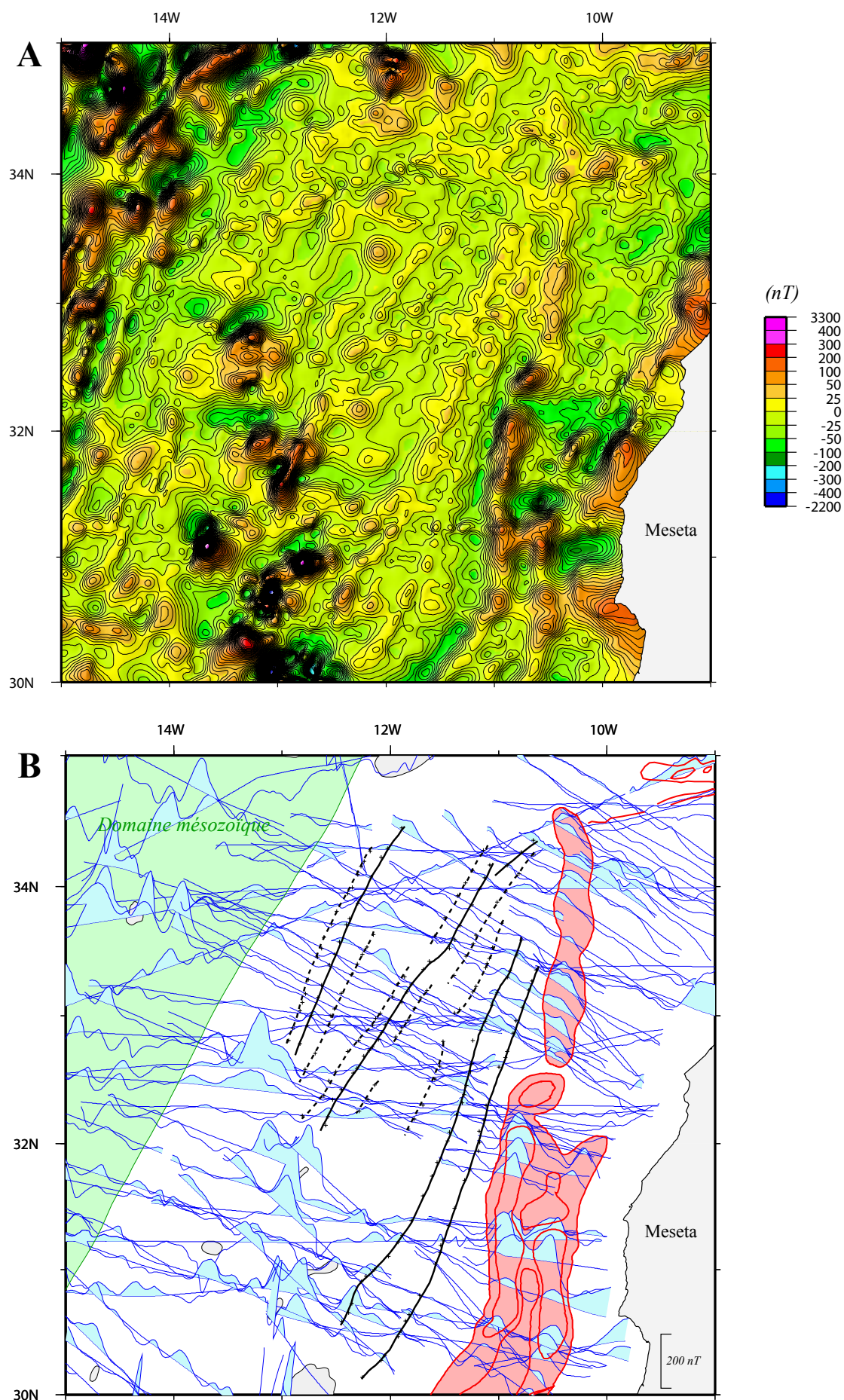


## Bassin de Sohm



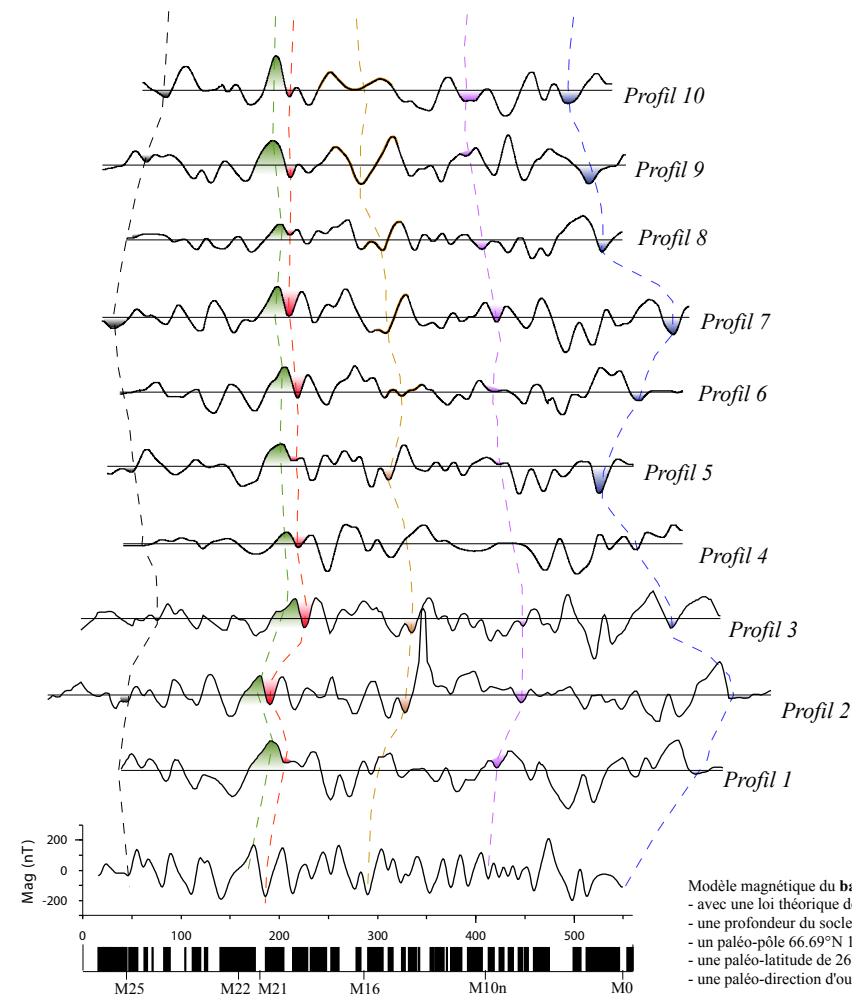
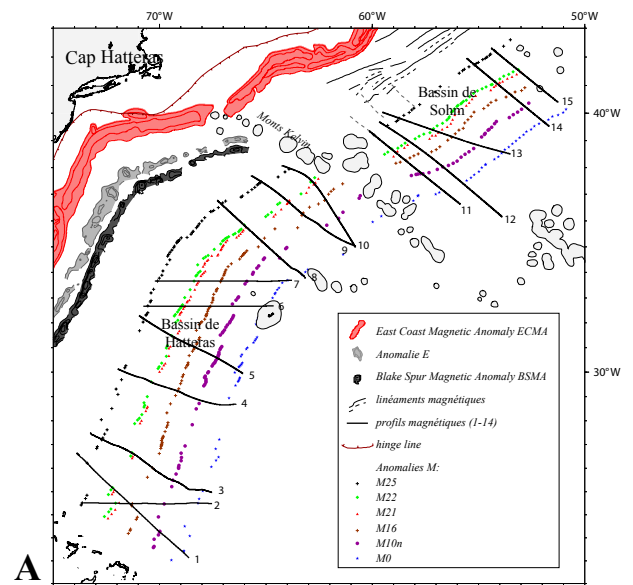
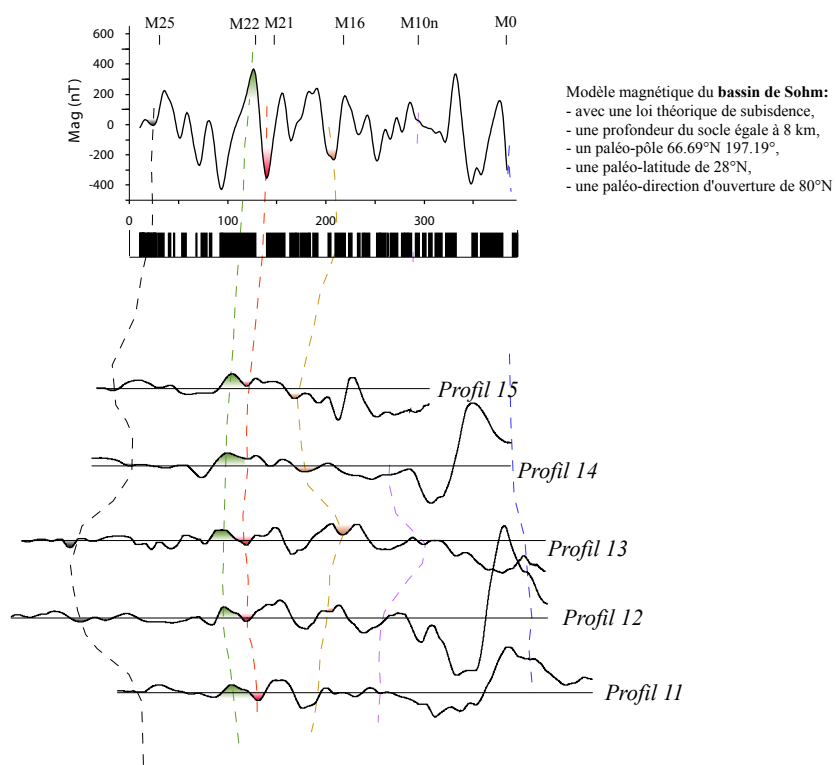
**Figure II-18** : Anomalies magnétiques linéaires dans le bassin de Sohm. La figure A est la carte des anomalies magnétiques réalisée à partir de la grille de Verhoef *et al.* (1996). La figure B correspond à l'interprétation des données de magnétisme, les valeurs de magnétisme sont projetées avec un angle de 10° le long des routes de navigation.

## Bassin de Seine

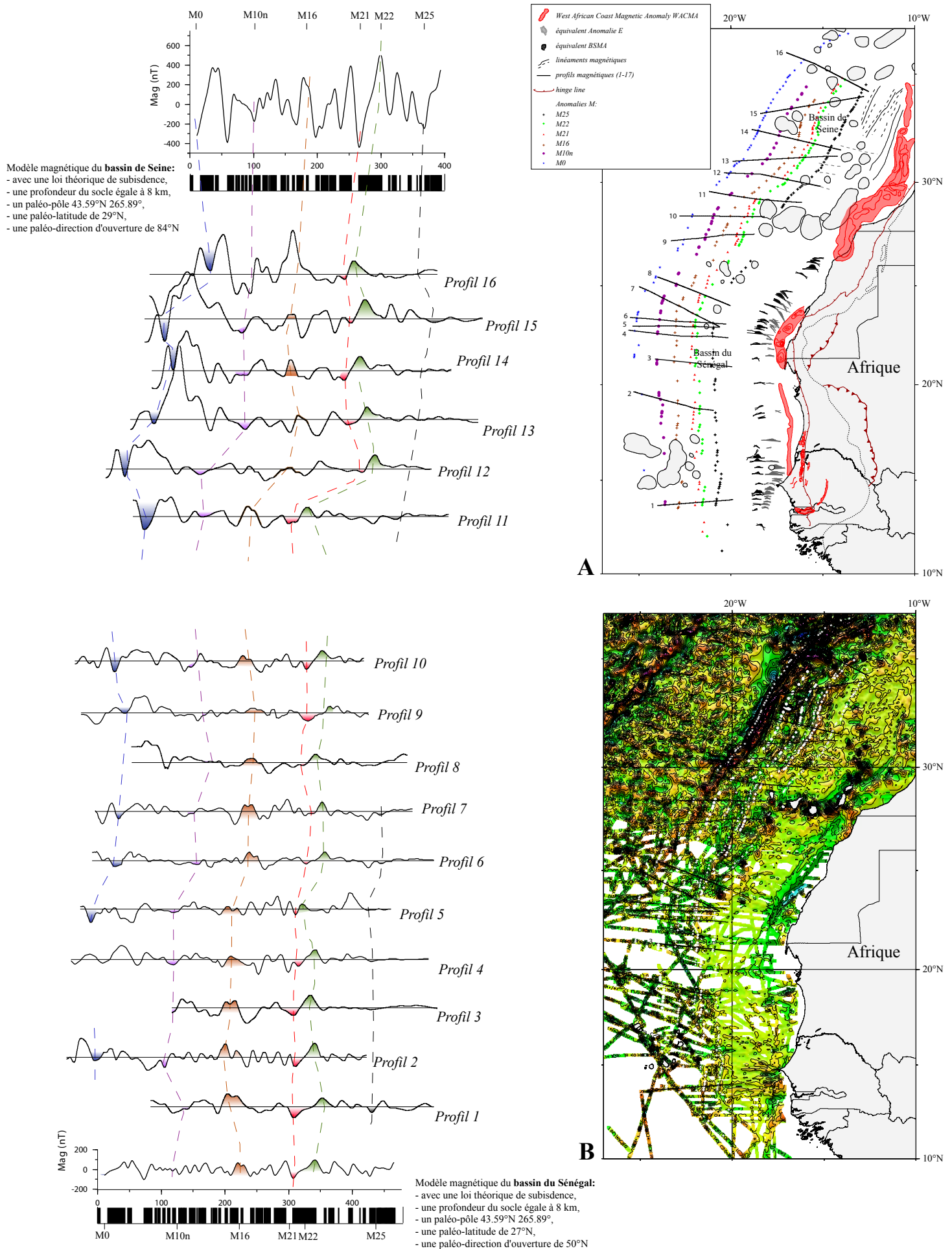


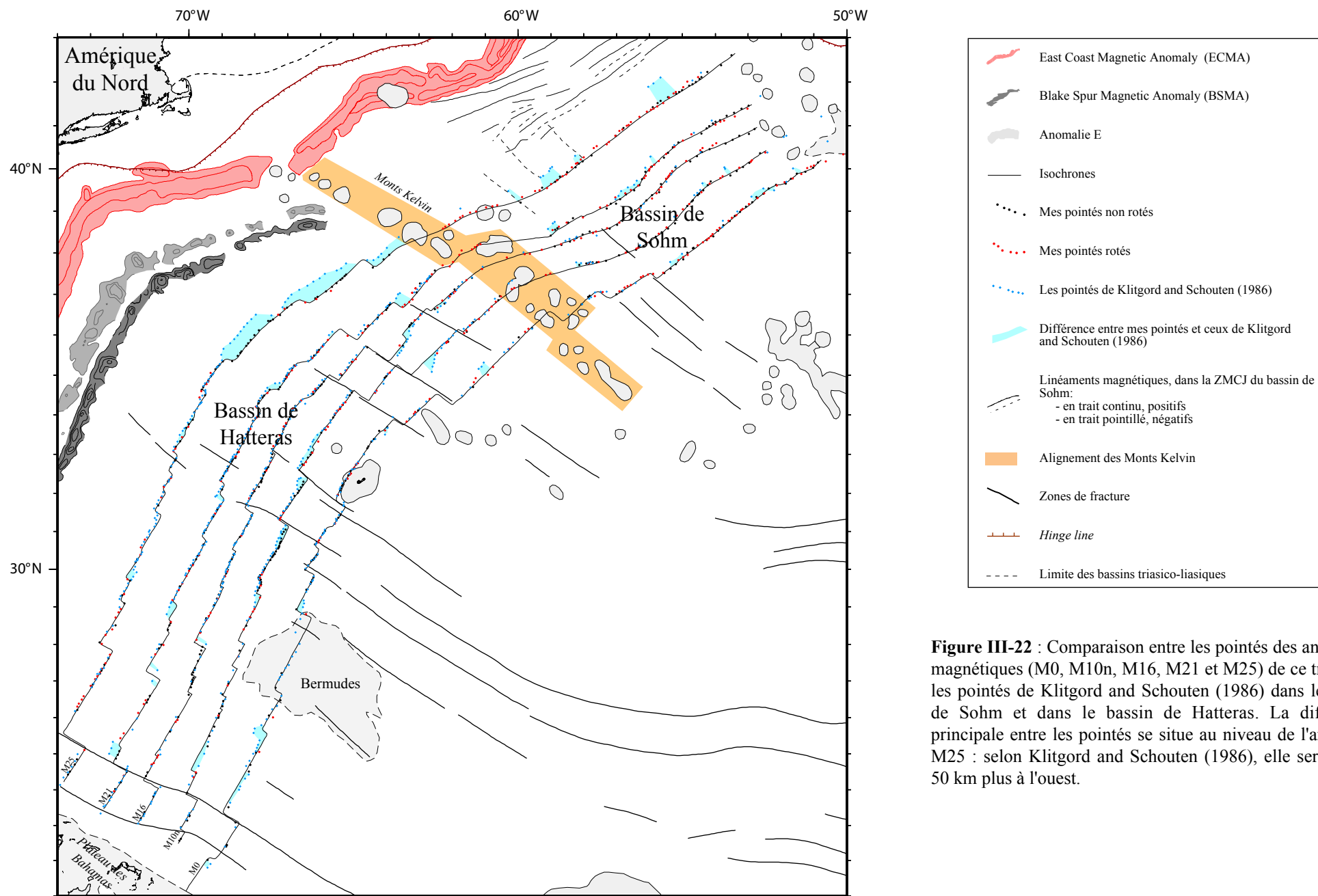
**Figure II-19** : Anomalies magnétiques linéaires dans le bassin de Seine, au large de la Meseta. La figure A est la carte des anomalies magnétiques réalisée à partir de la grille de Verhoef *et al.* (1996). La figure B correspond à l'interprétation des données de magnétisme, les valeurs de magnétisme sont projetées avec un angle de 10° le long des routes de navigation.



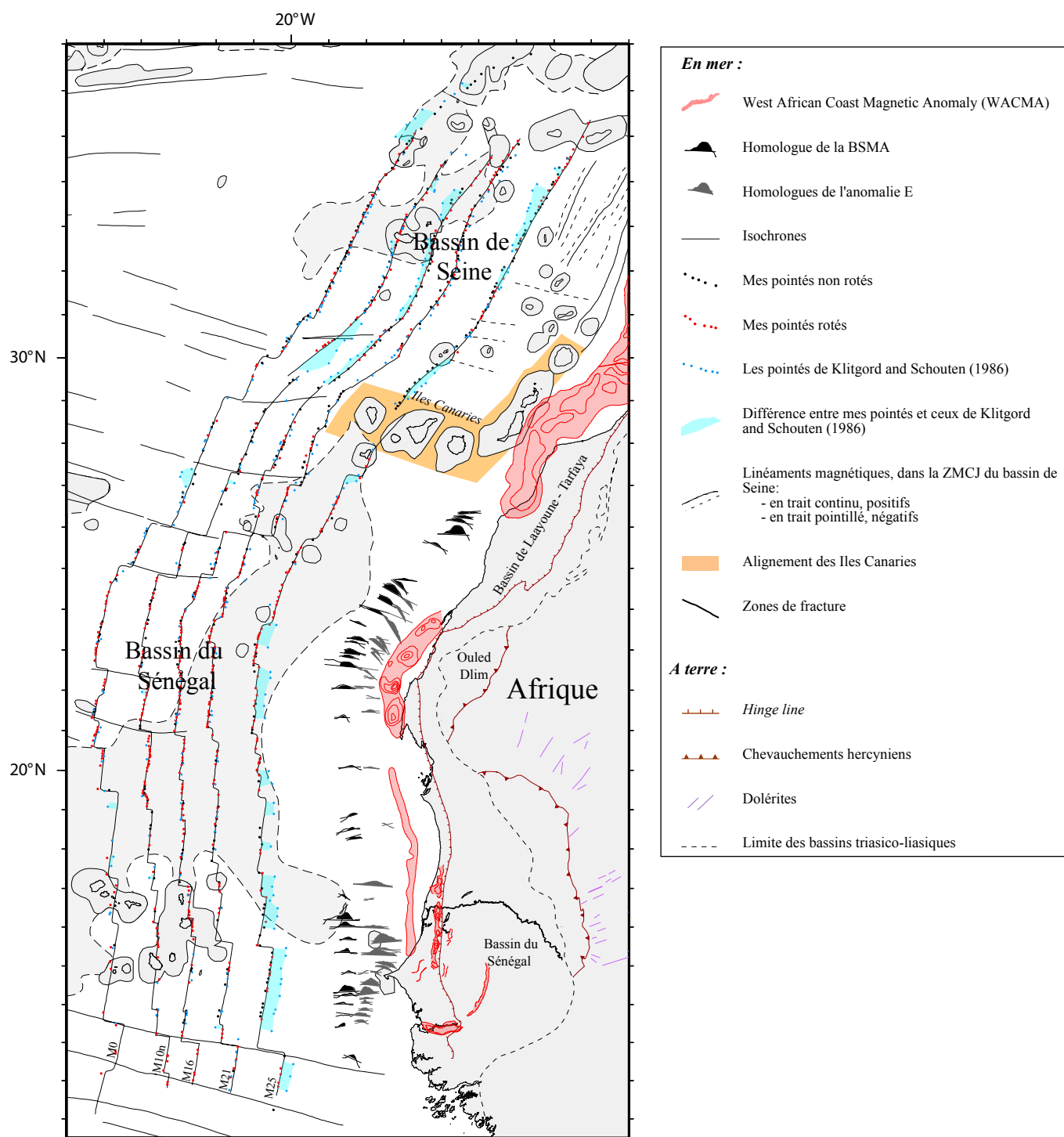


**Figure II-20 :** Coupes magnétiques sur la marge américaine, choisies à titre d'exemple parmi les données considérées (figures A et B). Les modèles magnétiques sont établis à partir de l'échelle de Gradstein *et al.* (2004) et des vitesses d'expansion déduites du présent travail (*cf.* figure II-47).



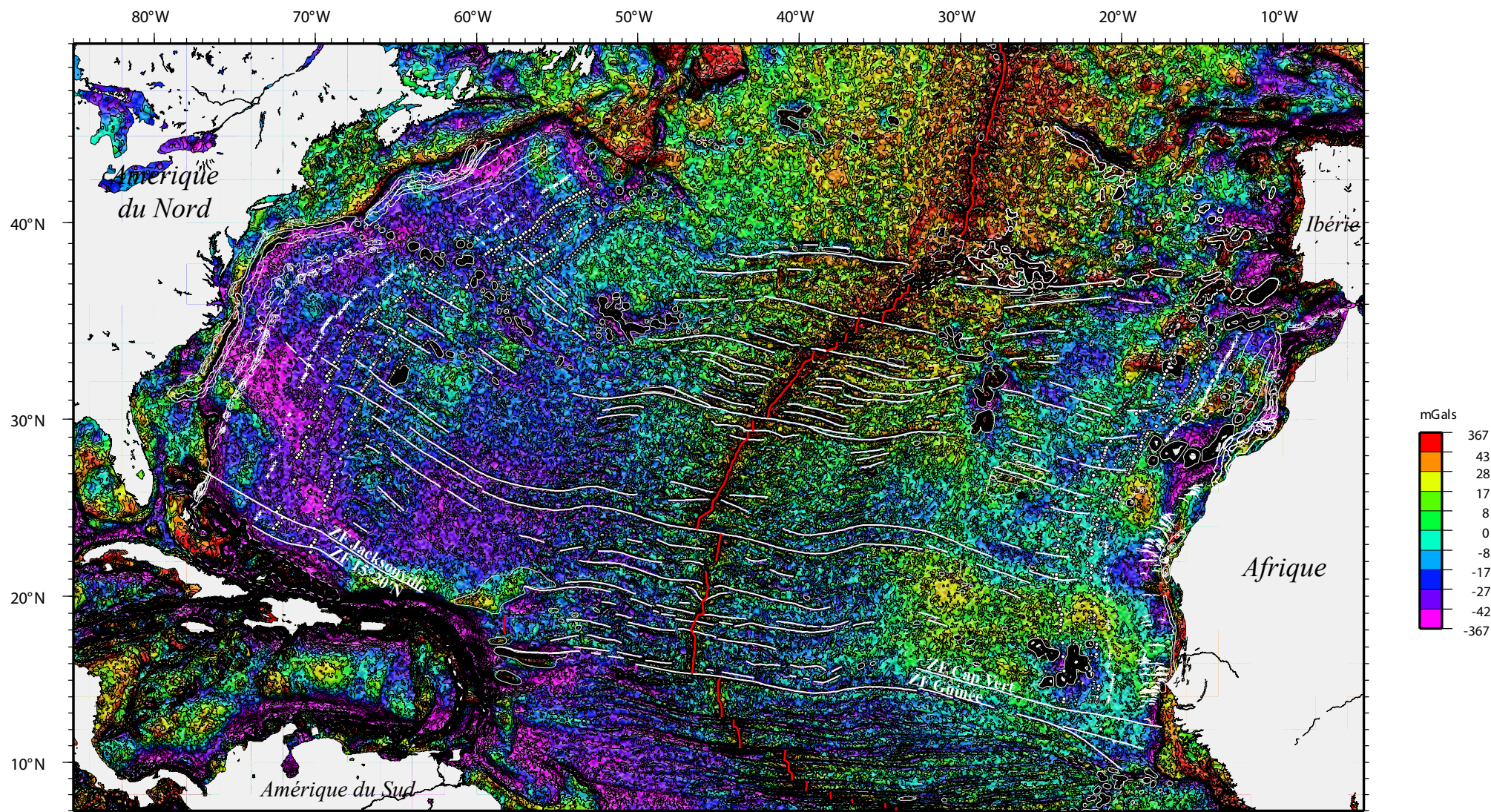


**Figure III-22 :** Comparaison entre les pointés des anomalies magnétiques (M0, M10n, M16, M21 et M25) de ce travail et les pointés de Klitgord and Schouten (1986) dans le bassin de Sohm et dans le bassin de Hatteras. La différence principale entre les pointés se situe au niveau de l'anomalie M25 : selon Klitgord and Schouten (1986), elle serait 40 à 50 km plus à l'ouest.



**Figure II-23 :** Comparaison entre les pointés des anomalies magnétiques (M0, M10n, M16, M21 et M25) de ce travail et les pointés de Klitgord and Schouten (1986) dans le bassin de Seine et dans le bassin du Sénégal. La différence de pointé pour l'anomalie M25 peut s'expliquer par des données magnétiques plus denses.

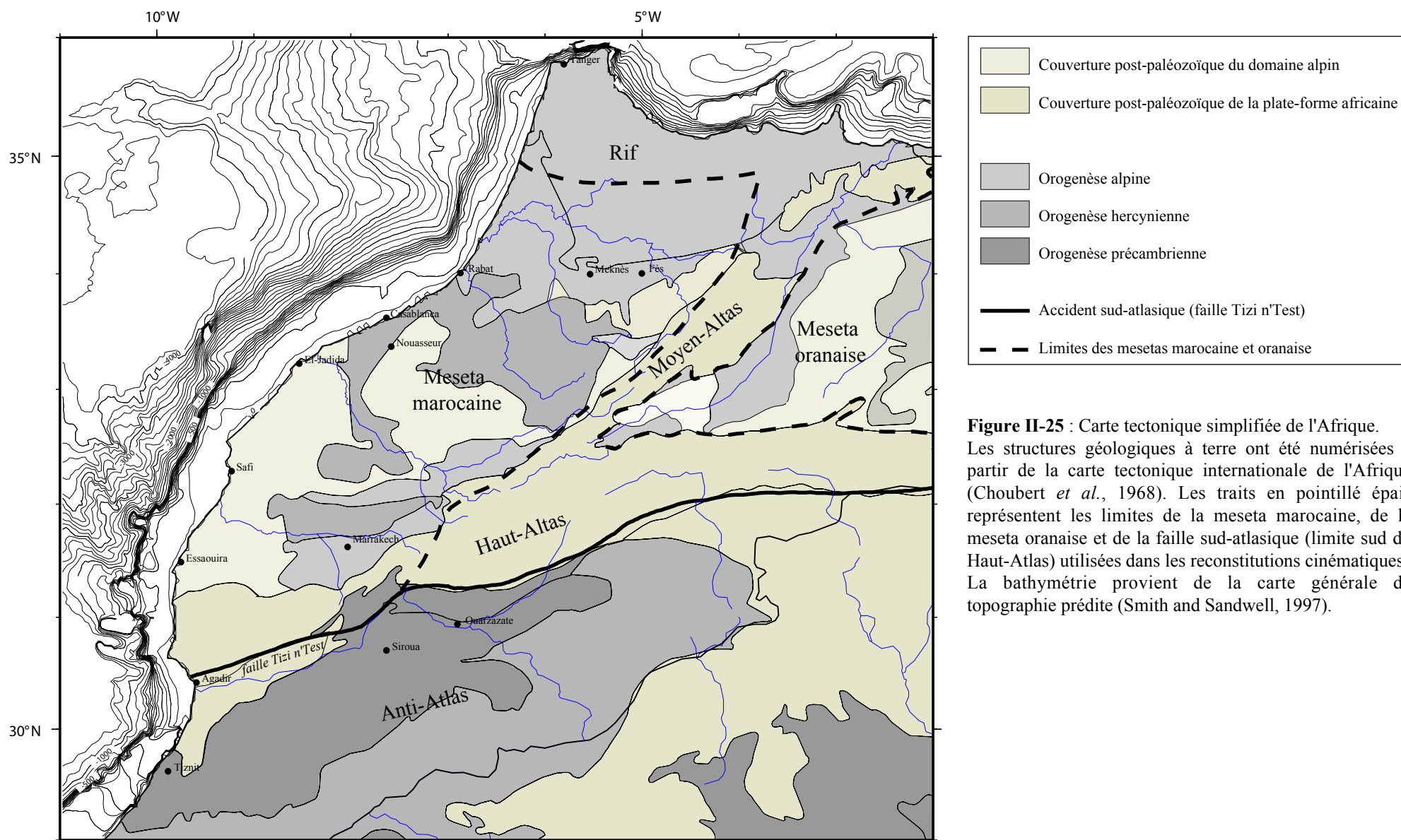




**Figure II-24** : Carte des anomalies altimétriques de l'Atlantique Central, réalisée à l'aide de la bibliothèque Generic Mapping Tools à partir des données gravimétriques de Sandwell and Smith (1997).

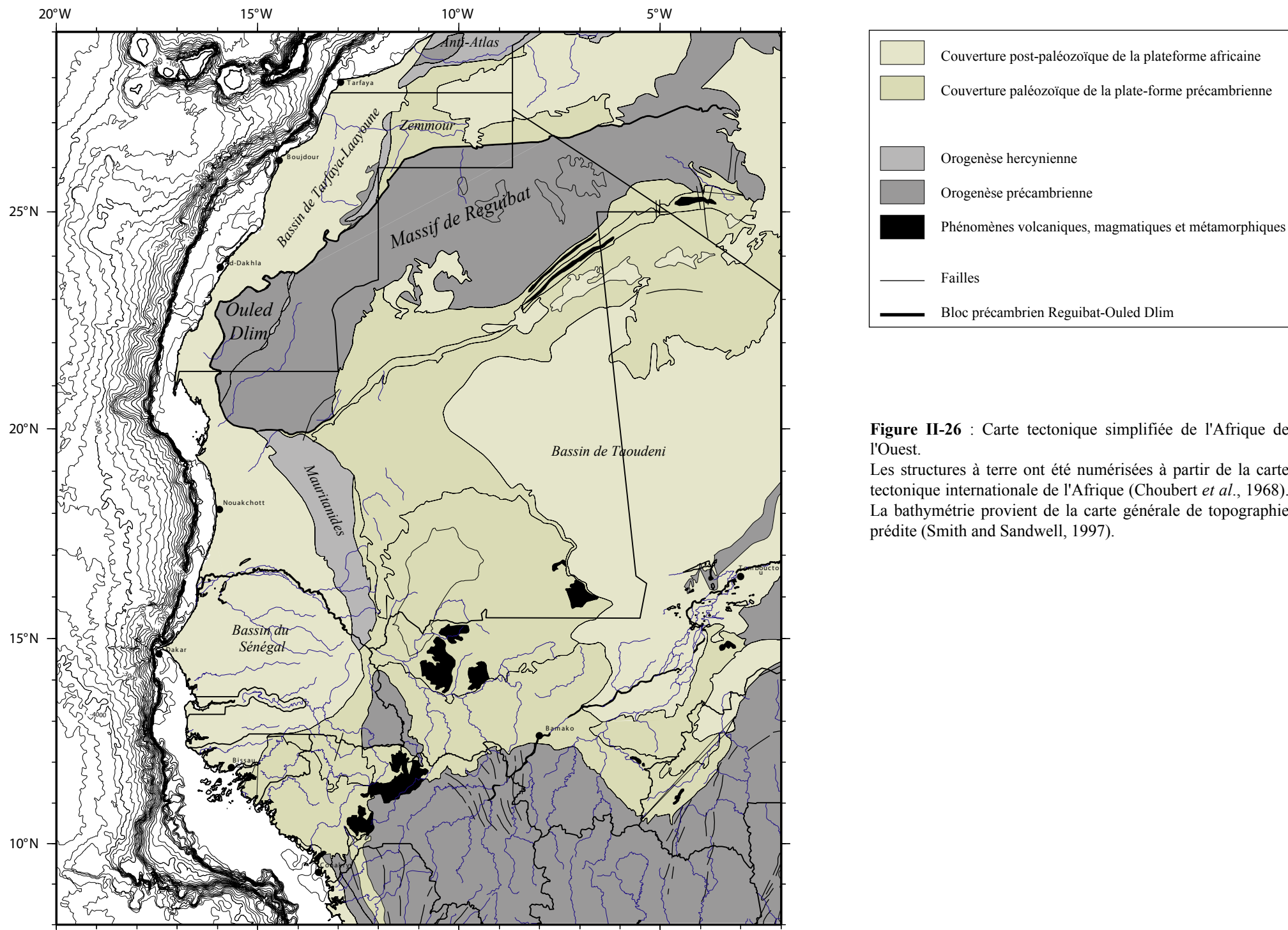
La palette de couleur va du rouge (pour les valeurs positives des anomalies) jusqu'au bleu et violet (pour les valeurs négatives). Les traits blancs représentent des repères morpho-structuraux interprétés sur les données altimétriques et simplifiés : les principales zones de fracture, les monts sous-marins, les édifices volcaniques comme le plateau des Açores, les Bermudes, etc.. La dorsale médio-atlantique est représentée par un trait rouge. Les symboles blancs (croix, ronds, triangles,...) correspondent aux anomalies magnétiques pointées et utilisées dans les reconstitutions cinématiques.





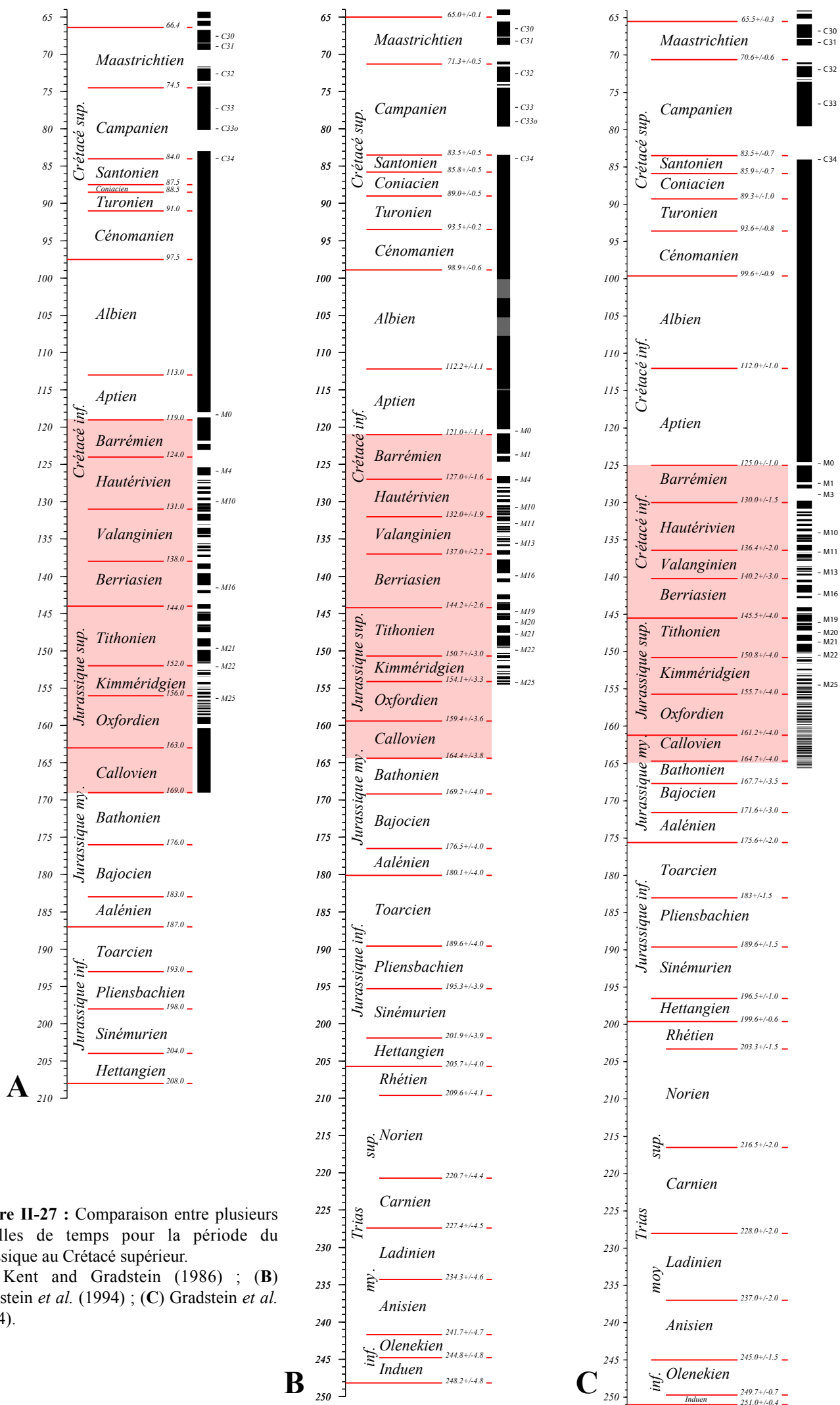
**Figure II-25 :** Carte tectonique simplifiée de l'Afrique.

Les structures géologiques à terre ont été numérisées à partir de la carte tectonique internationale de l'Afrique (Choubert *et al.*, 1968). Les traits en pointillé épais représentent les limites de la meseta marocaine, de la meseta oranaise et de la faille sud-atlasique (limite sud du Haut-Atlas) utilisées dans les reconstitutions cinématiques. La bathymétrie provient de la carte générale de topographie prédite (Smith and Sandwell, 1997).



**Figure II-26 :** Carte tectonique simplifiée de l'Afrique de l'Ouest.

Les structures à terre ont été numérisées à partir de la carte tectonique internationale de l'Afrique (Choubert *et al.*, 1968). La bathymétrie provient de la carte générale de topographie prédite (Smith and Sandwell, 1997).



**Figure II-27 :** Comparaison entre plusieurs échelles de temps pour la période du Jurassique au Crétacé supérieur. (A) Kent and Gradstein (1986) ; (B) Gradstein *et al.* (1994) ; (C) Gradstein *et al.* (2004).



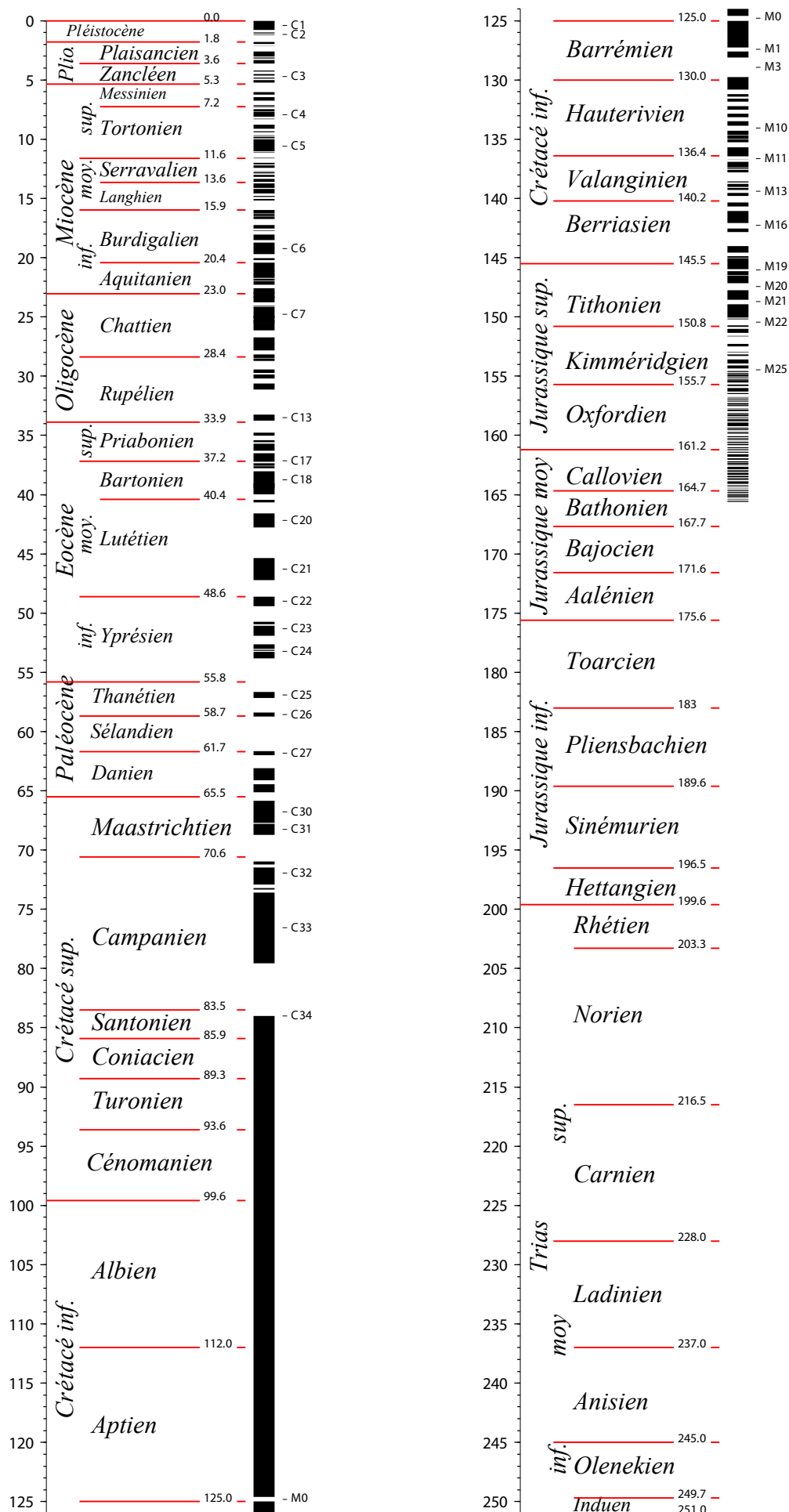
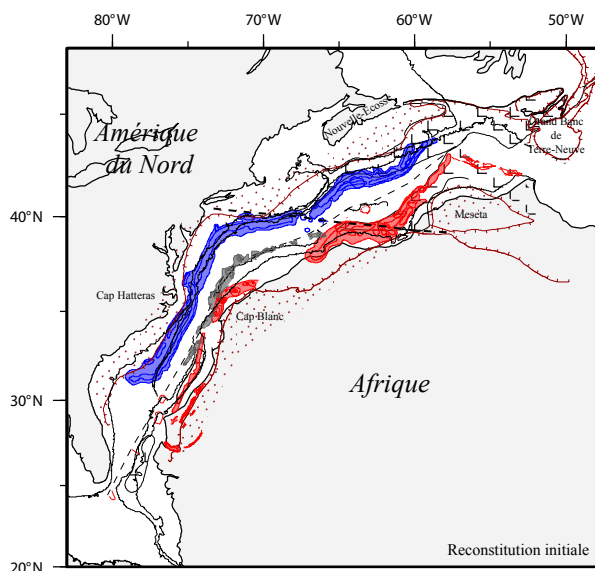


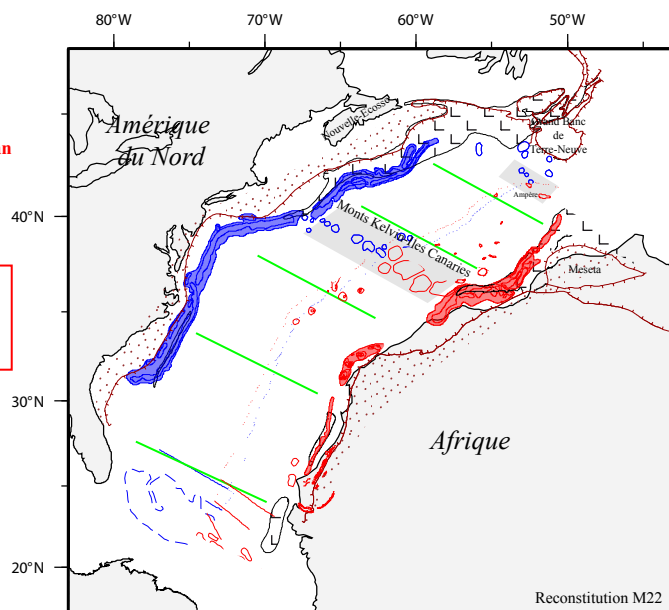
Figure II-28 : Echelle chronomagnétique et stratigraphique de Gradstein *et al.* (2004) utilisée dans le présent travail.



**A.** - Juxtaposition des provinces salifères  
 - Alignement des failles Tizi n'Test et 40°N (trait en pointillés noirs)  
 - Superposition de l'anomalie E américaine (en gris) et du pied de la pente continentale africaine

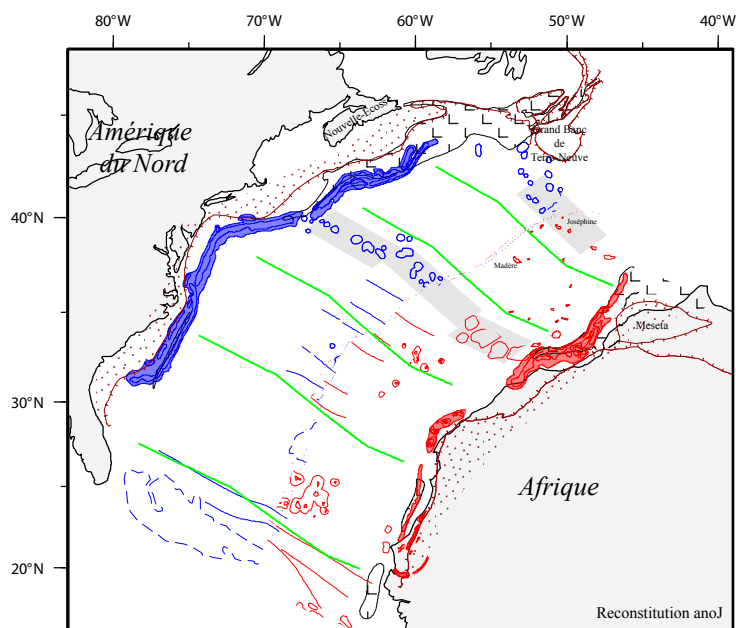
**BSMA**  
 lent | 3,5 cm/an

**BSMA :**  
 Accélération de la  
 vitesse d'accrétion  
 (3,7 cm/an)



**B.** - Alignement des Monts Kelvin-Iles Canaries  
 - Alignement de la ride Ampère avec la marge sud-ouest du Grand Banc de Terre-Neuve

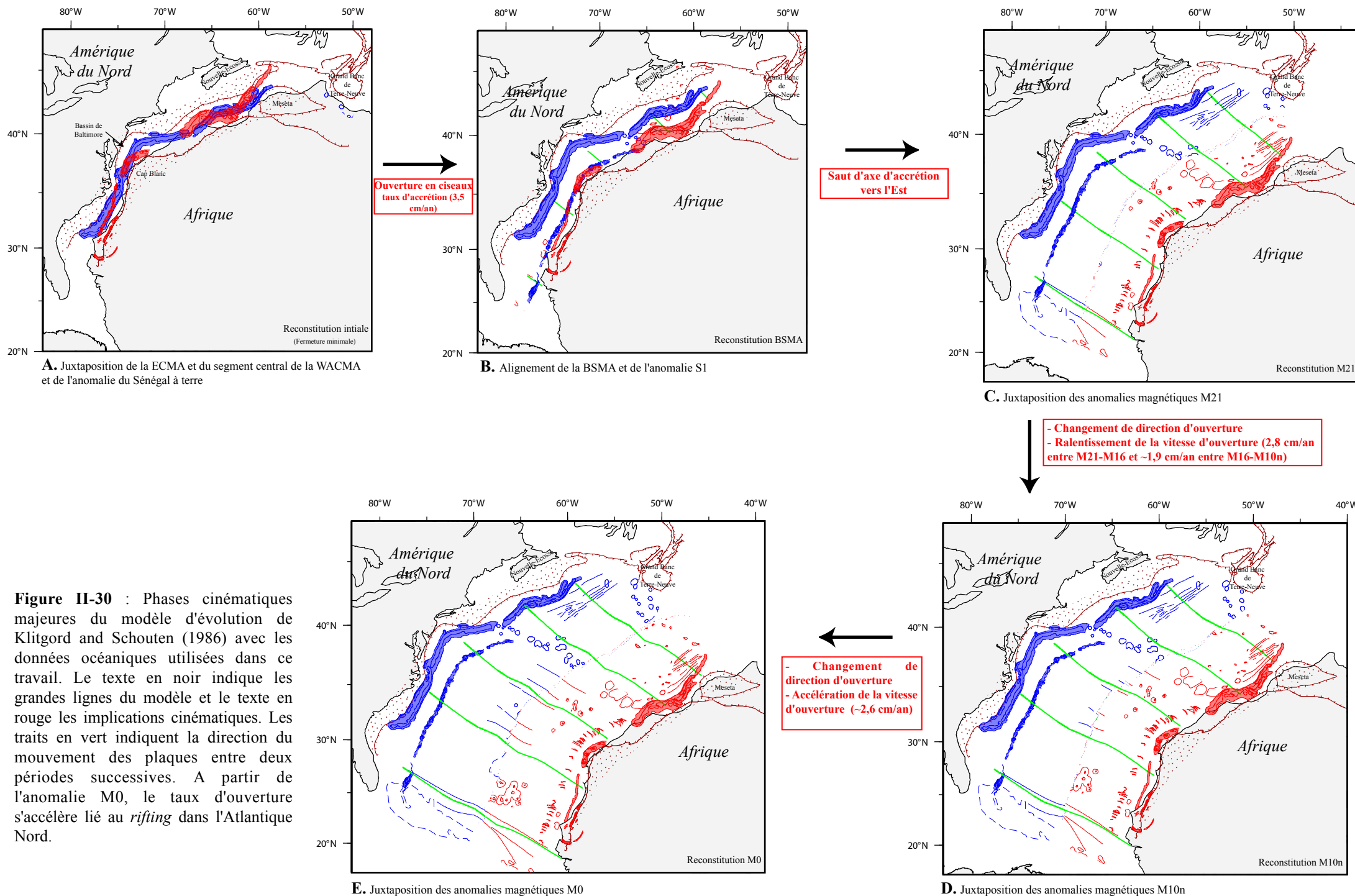
**Ralentissement de la vitesse d'accrétion océanique (1,7 cm/an)**  
**Changement de direction du mouvement des plaques**



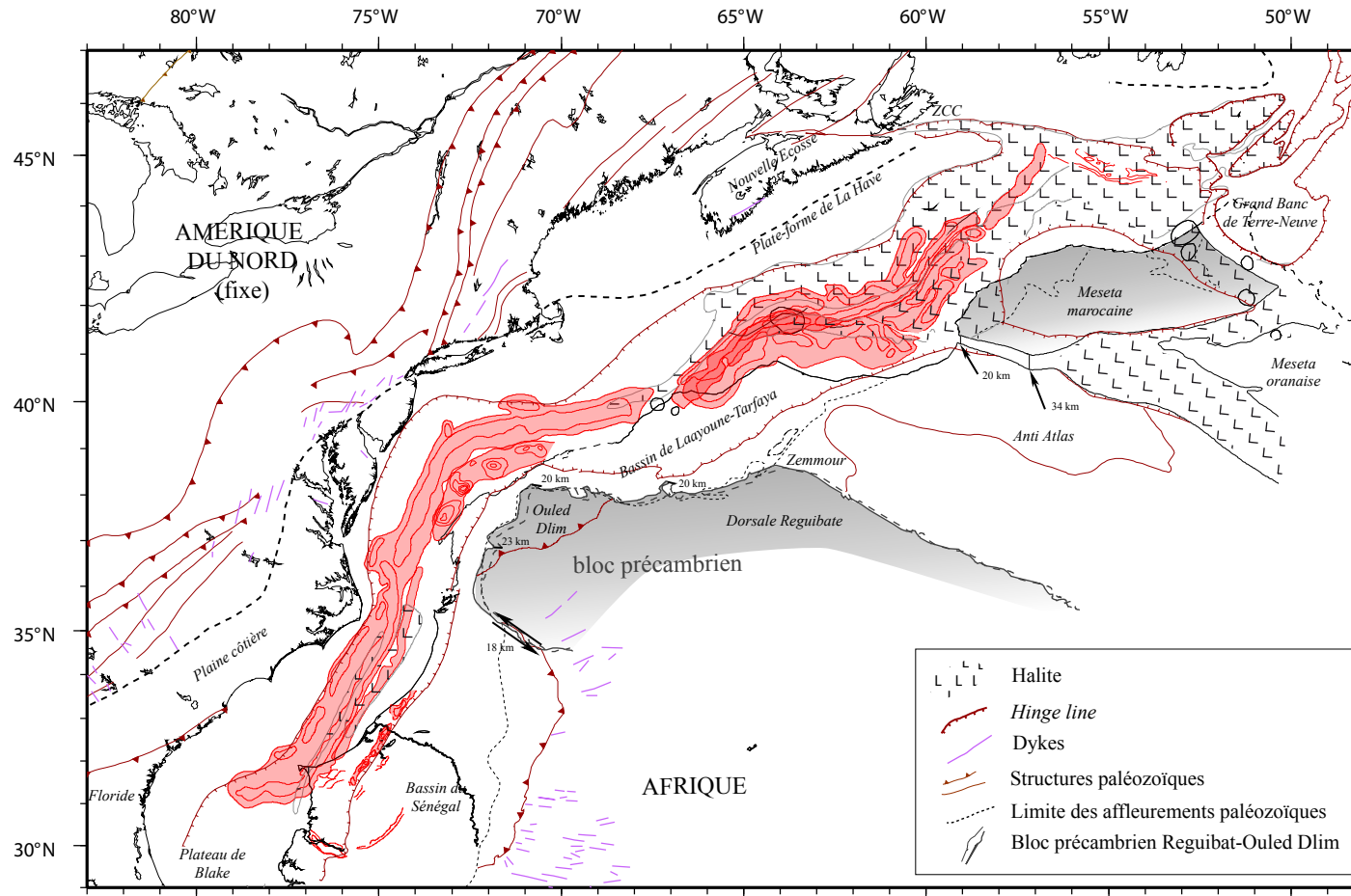
**C.** - Juxtaposition des anomalies magnétiques J  
 - Superposition de la ride Sud de Terre-Neuve et de Joséphine-Madère

**Figure II-29 :** Grandes phases cinématiques du modèle d'évolution de Olivet *et al.* (1984) avec les données océaniques (anomalies magnétiques et zones de fracture) utilisées dans ce travail.

Le texte en noir indique les grandes lignes directrices suivies par les auteurs pour aboutir aux reconstructions présentées et le texte en rouge les implications cinématiques. Les traits en vert indiquent la direction du mouvement des plaques entre deux périodes successives. A noter que l'accélération du taux d'ouverture à partir de la BSMA est suggérée par un changement de morphologie du socle. Le taux initial d'ouverture est extrêmement lent. A partir de l'anomalie M0, l'ouverture océanique est plus rapide. Le mouvement de l'Ibérie épouse celui de l'Afrique, entraînant ainsi l'ouverture du Golfe de Gascogne.







**Figure II-31** : Reconstruction à 195 Ma (fin du Sinémurien) de l'océan Atlantique Central (modifiée à partir de Sahabi *et al.*, 2004). Ici, il s'agit d'un système à quatre plaques. L'Afrique est divisée en trois : la plaque Afrique, la Meseta et le bloc précambrien Reguibat-Ouled Dlim. L'ajustement du segment central de la WACMA avec la ECMA nécessite un mouvement sénestre d'une vingtaine de kilomètres entre l'Afrique et le bloc précambrien. Ce découplage implique une extension post-triasique E-W d'une vingtaine de kilomètres dans le bassin de Laayoune-Tarfaya et un décrochement dextre de 18 km à la limite sud du bloc précambrien.

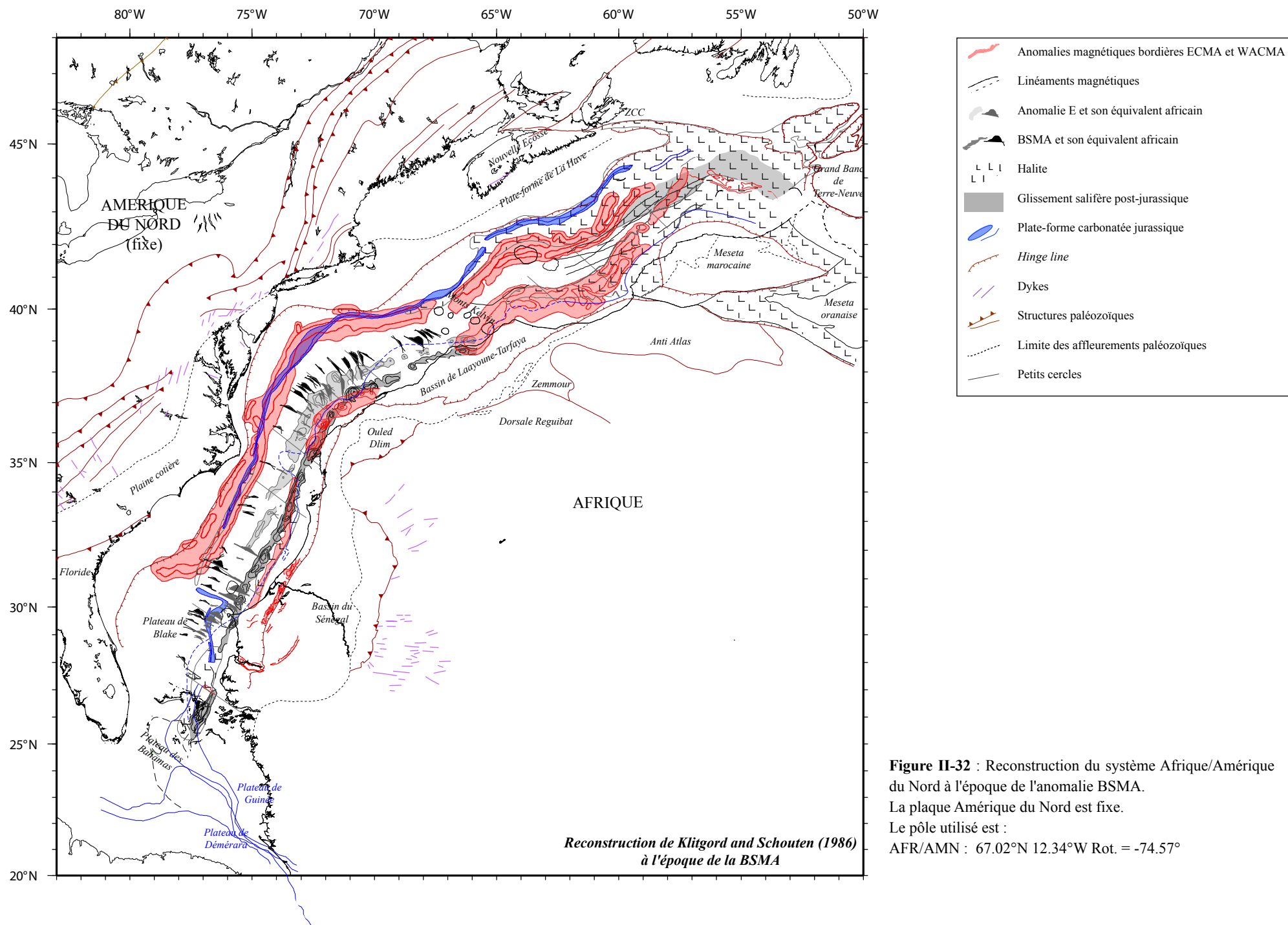
La plaque Amérique du Nord est fixe.

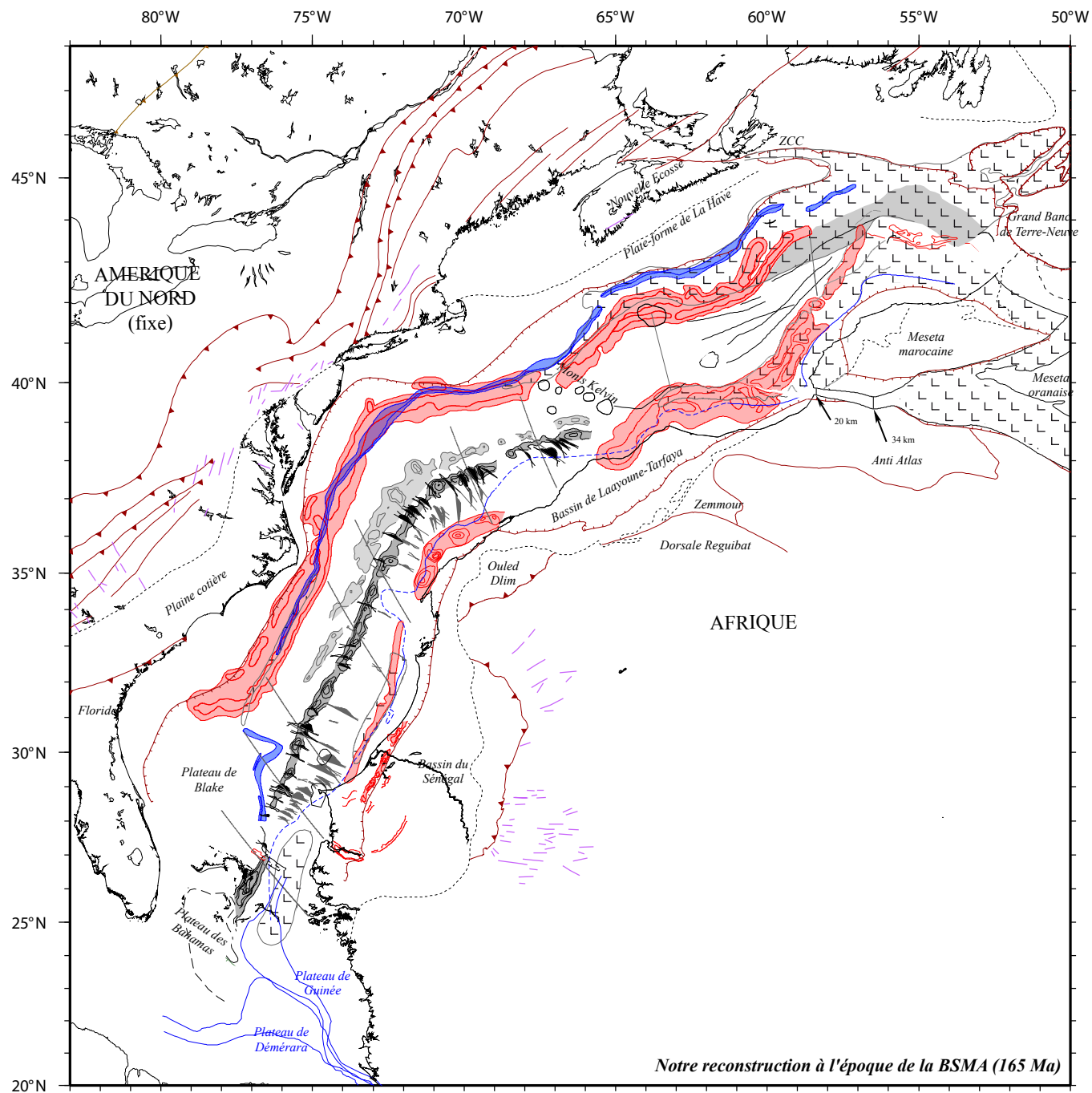
Les pôles utilisés sont:

AFR/AMN : 64.31°N 15.19°W Rot. = -77.09°

MES/AMN : 66.31°N 11.78°W Rot. = -72.95°

KRA/AMN : 64.42°N 15.13°W Rot. = -77.21°





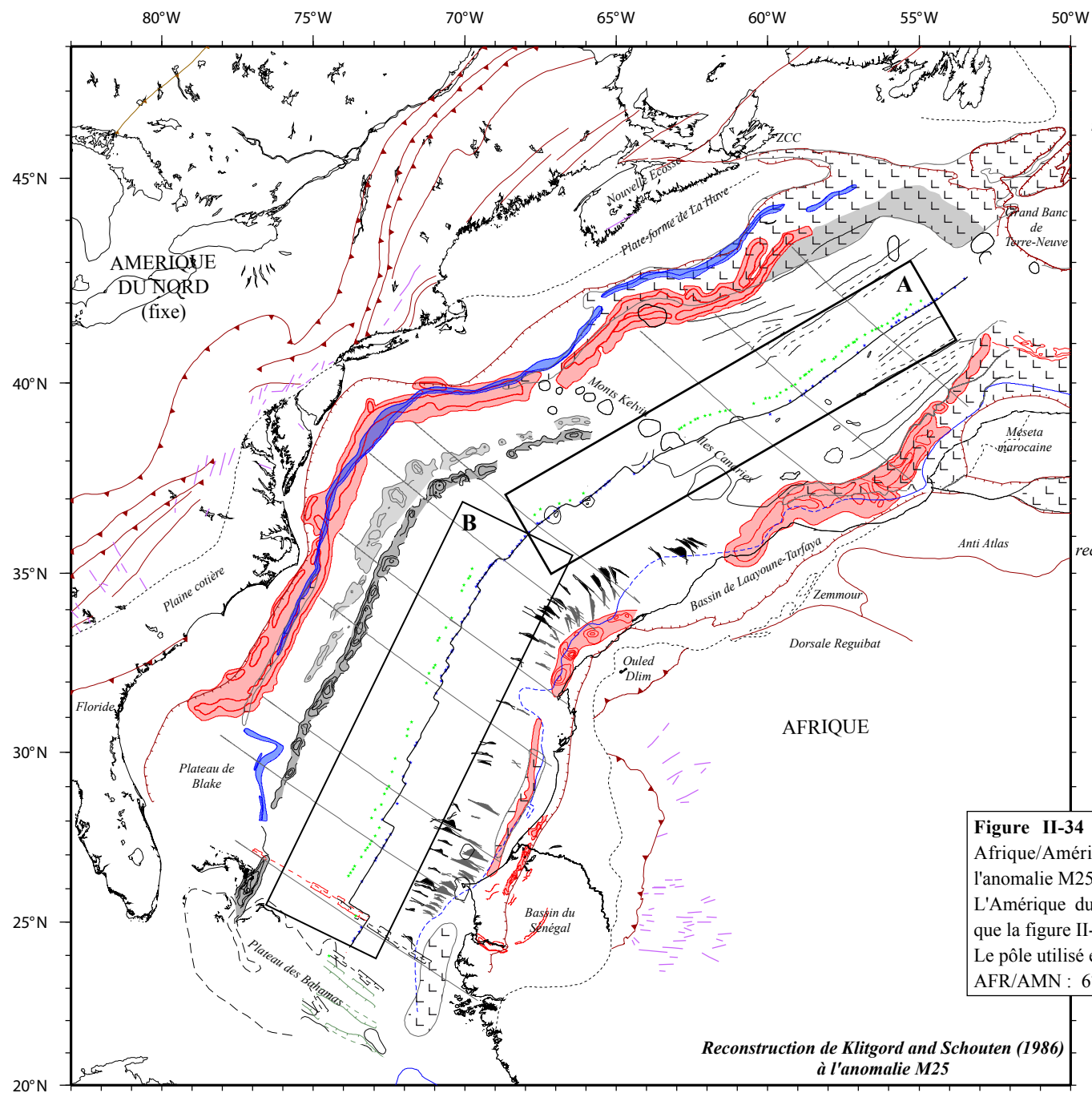
**Figure II-33** : Reconstruction du système Afrique/Meseta/Amérique du Nord à l'époque de la BSMA (165 Ma, limite Bathonien-Callovien). La plaque Amérique du Nord est fixe. Même légende que la figure II-32.

Les pôles utilisés sont :

AFR/AMN : 66.09°N 13.86°W Rot. = -70.55°

MES/AMN : 69.47°N 09.56°W Rot. = -66.59°



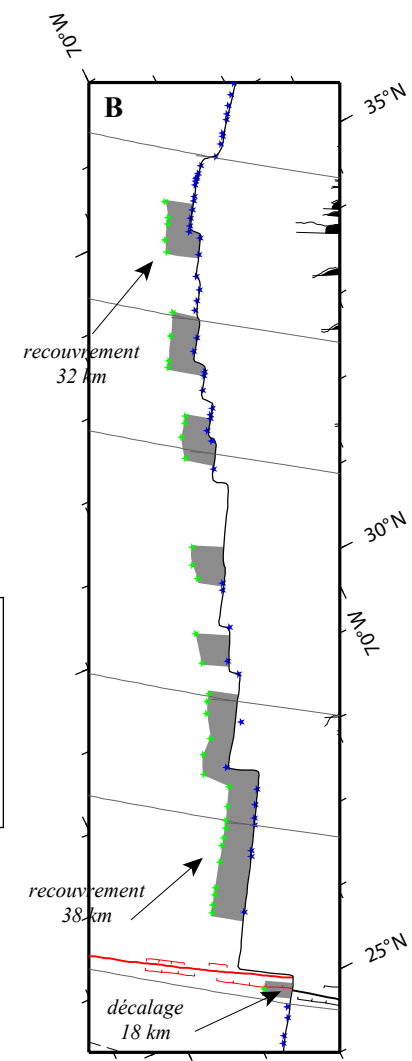
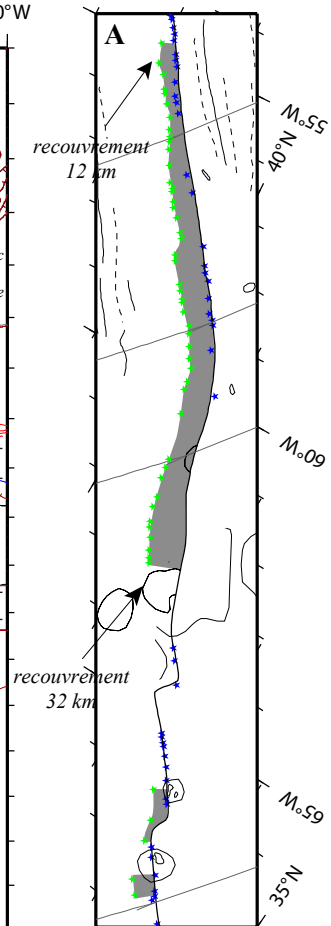


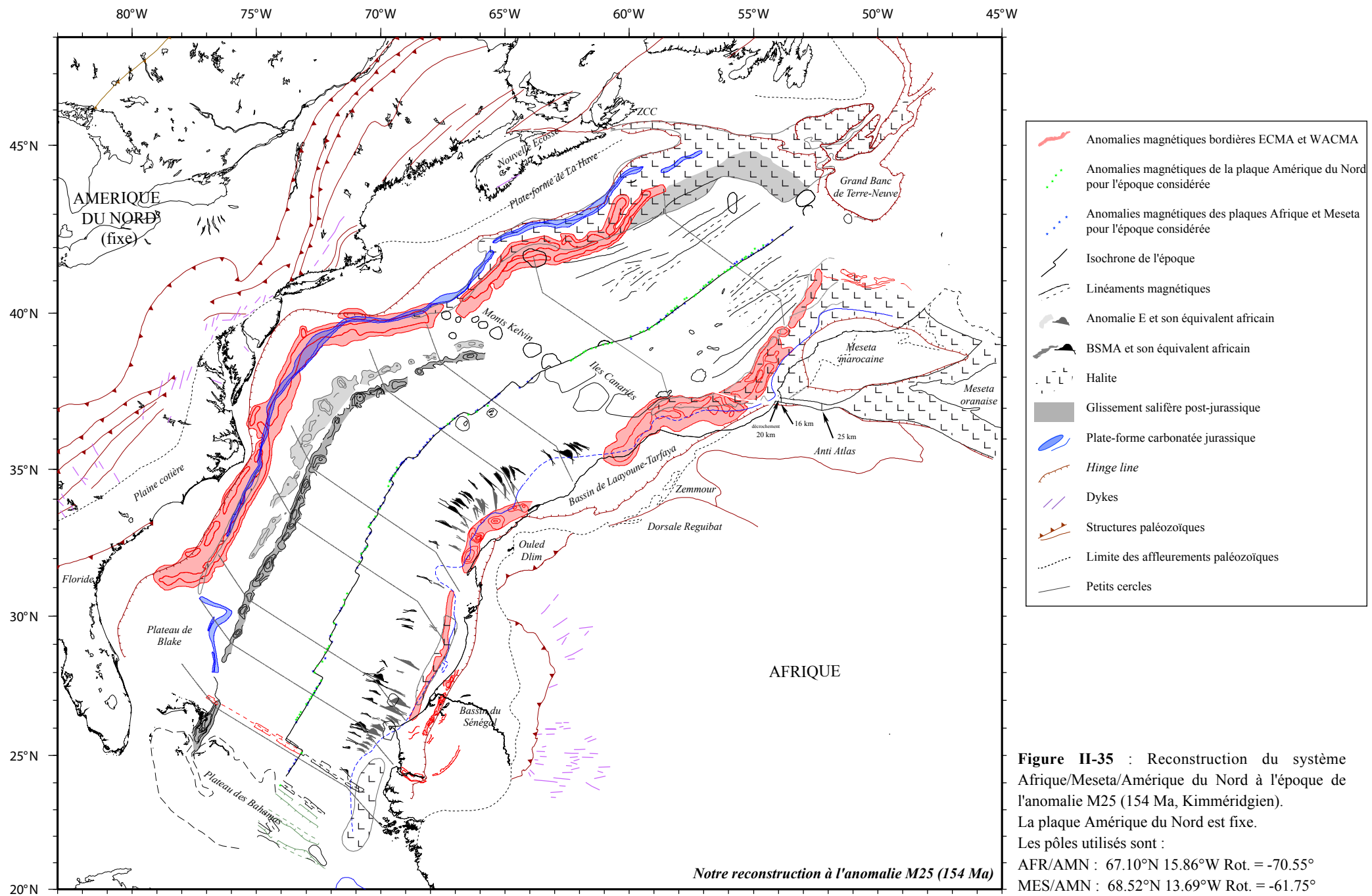
*Reconstruction de Klitgord and Schouten (1986)  
à l'anomalie M25*

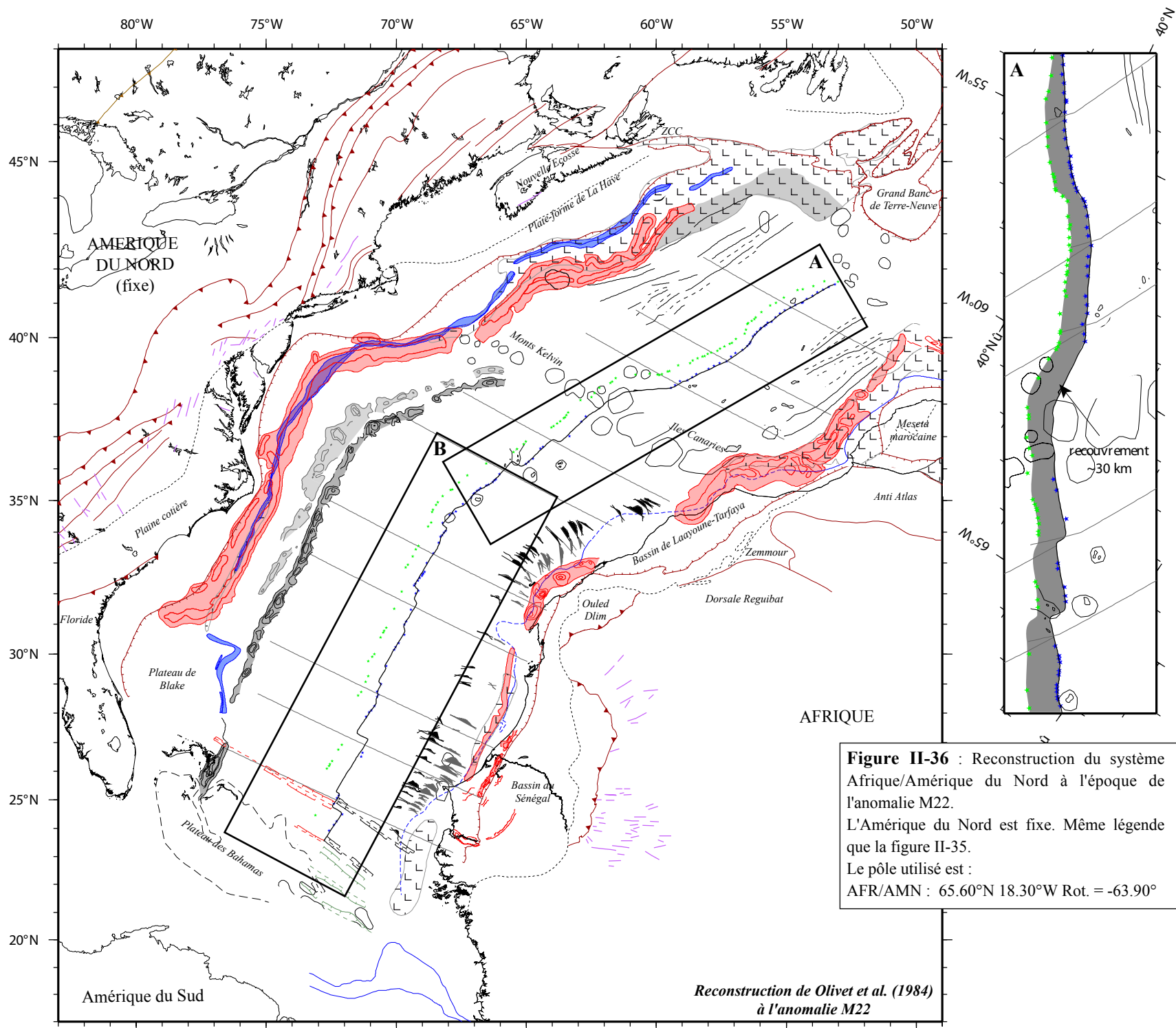
**Figure II-34 :** Reconstruction du système Afrique/Amérique du Nord à l'époque de l'anomalie M25.

L'Amérique du Nord est fixe. Même légende que la figure II-35.

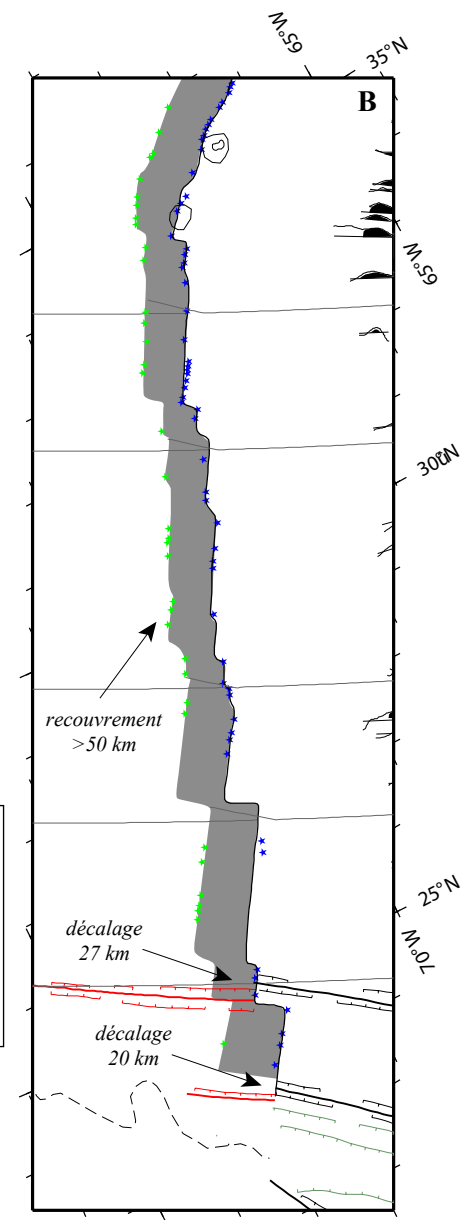
Le pôle utilisé est :  
AFR/AMN : 67.15°N 16.00°W Rot. = -64.70°



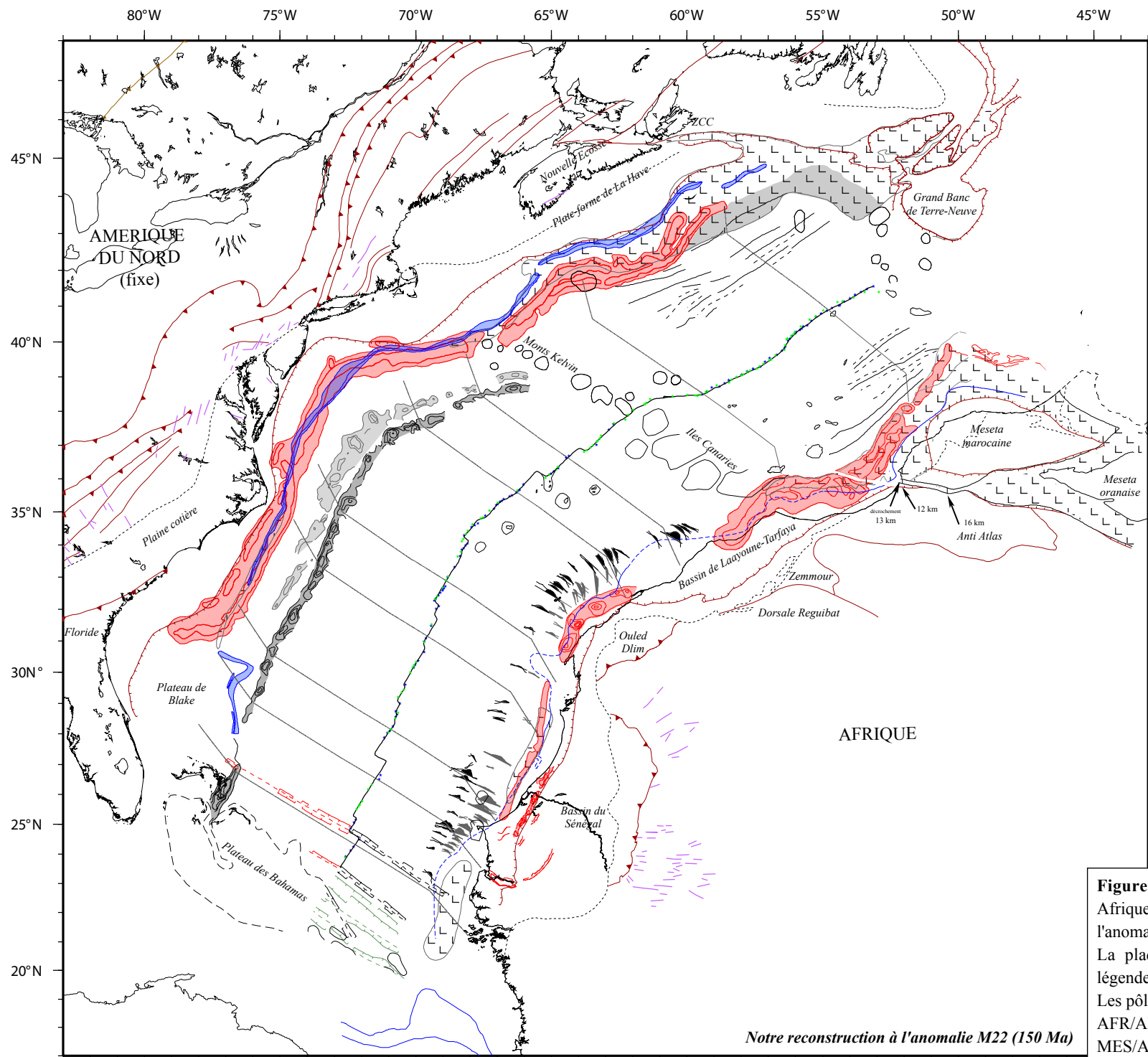


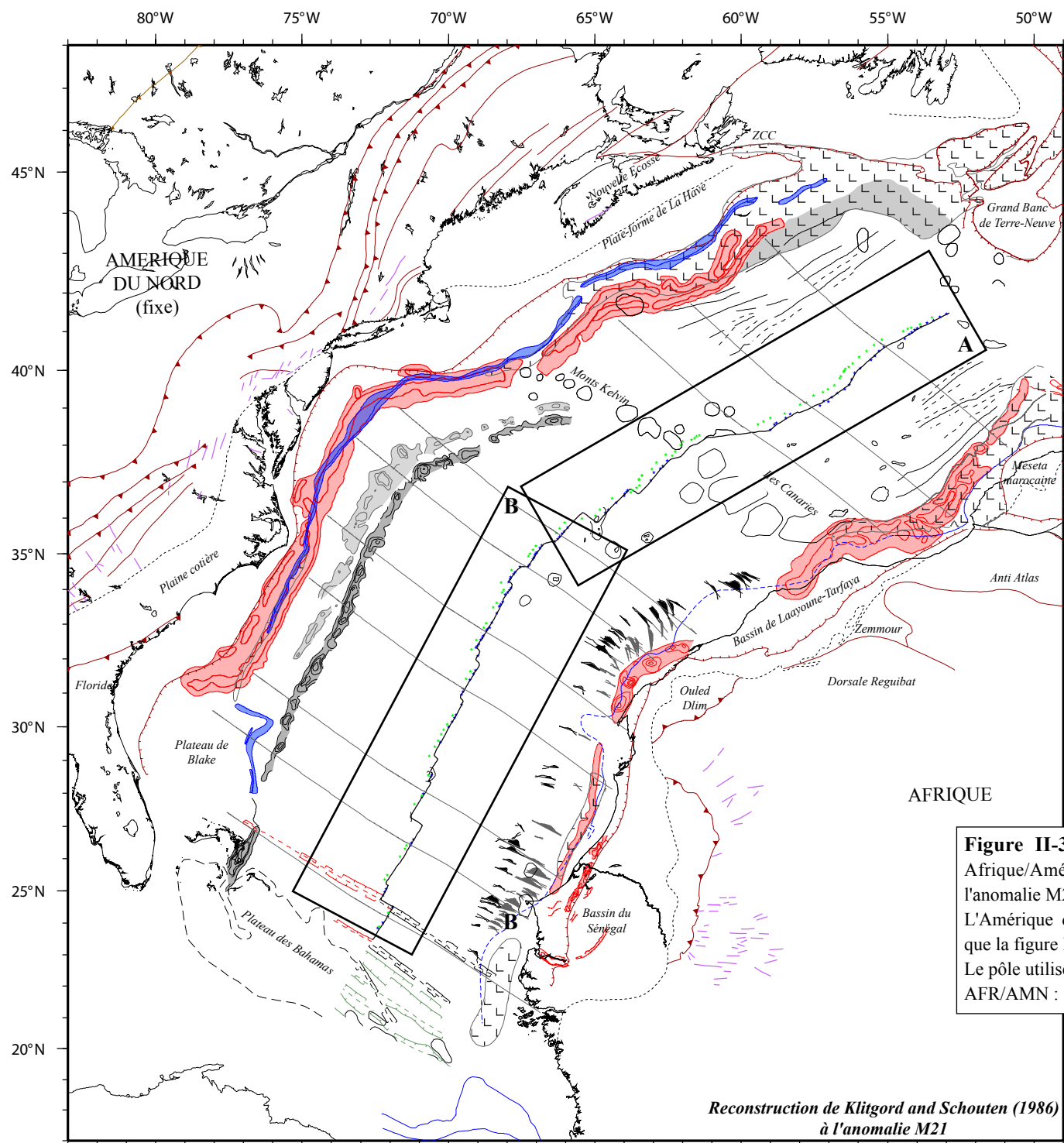


**Figure II-36 :** Reconstruction du système Afrique/Amérique du Nord à l'époque de l'anomalie M22. L'Amérique du Nord est fixe. Même légende que la figure II-35. Le pôle utilisé est : AFR/AMN : 65.60°N 18.30°W Rot. = -63.90°



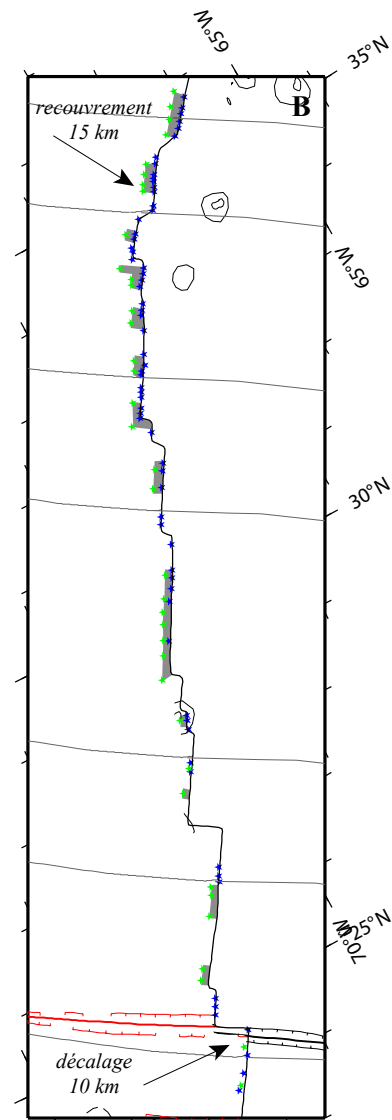
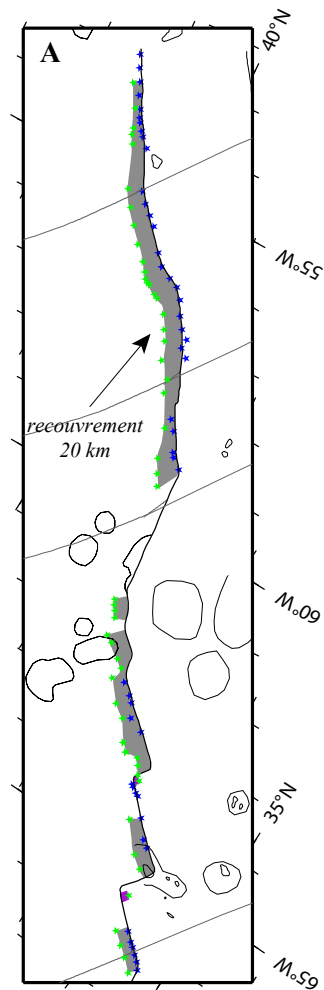


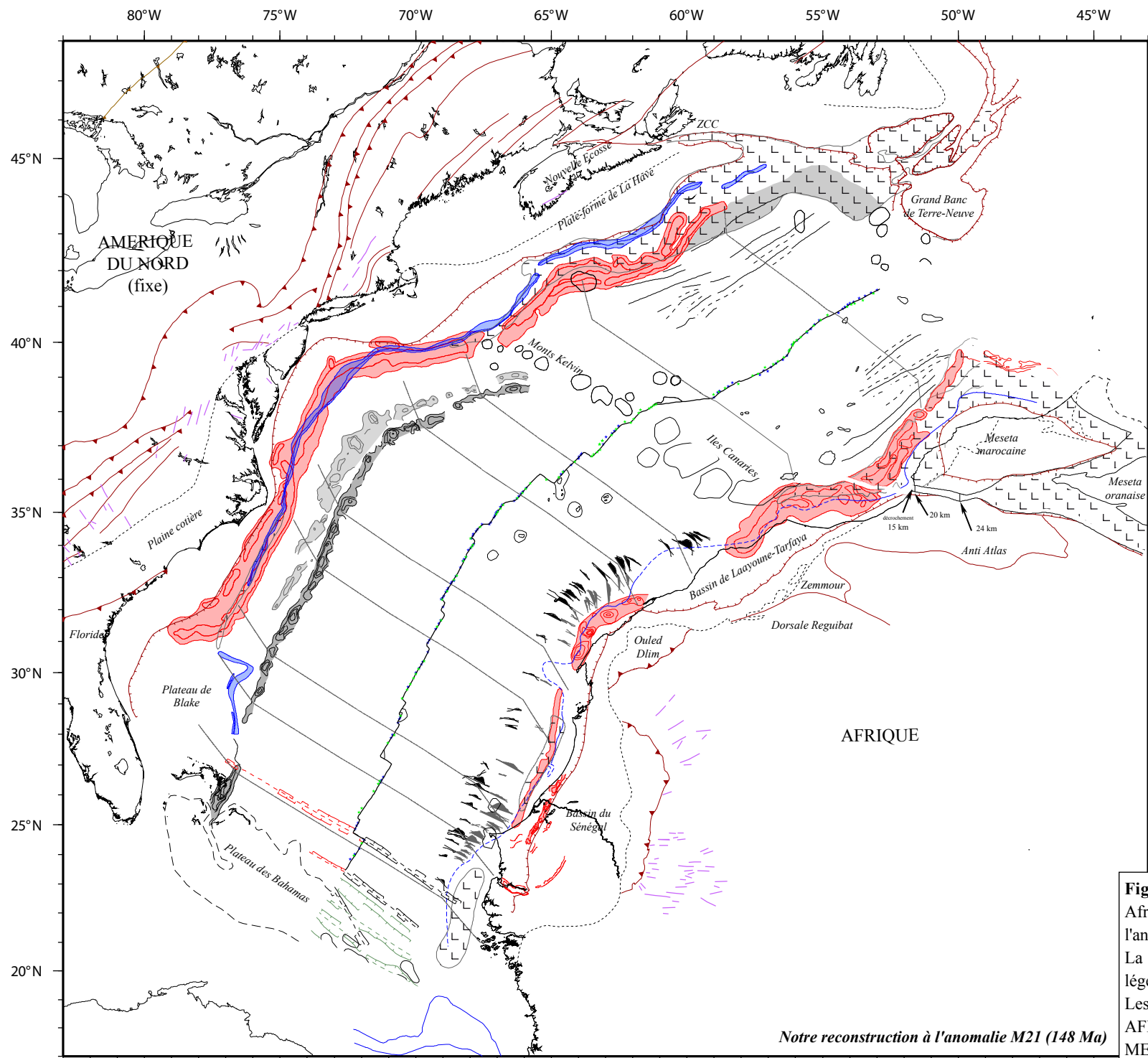




**Figure II-38 :** Reconstruction du système Afrique/Amérique du Nord à l'époque de l'anomalie M21.  
L'Amérique du Nord est fixe. Même légende que la figure II-35.  
Le pôle utilisé est :  
AFR/AMN : 66.50°N 18.10°W Rot. = -61.92°

Reconstruction de Klitgord and Schouten (1986)  
à l'anomalie M21



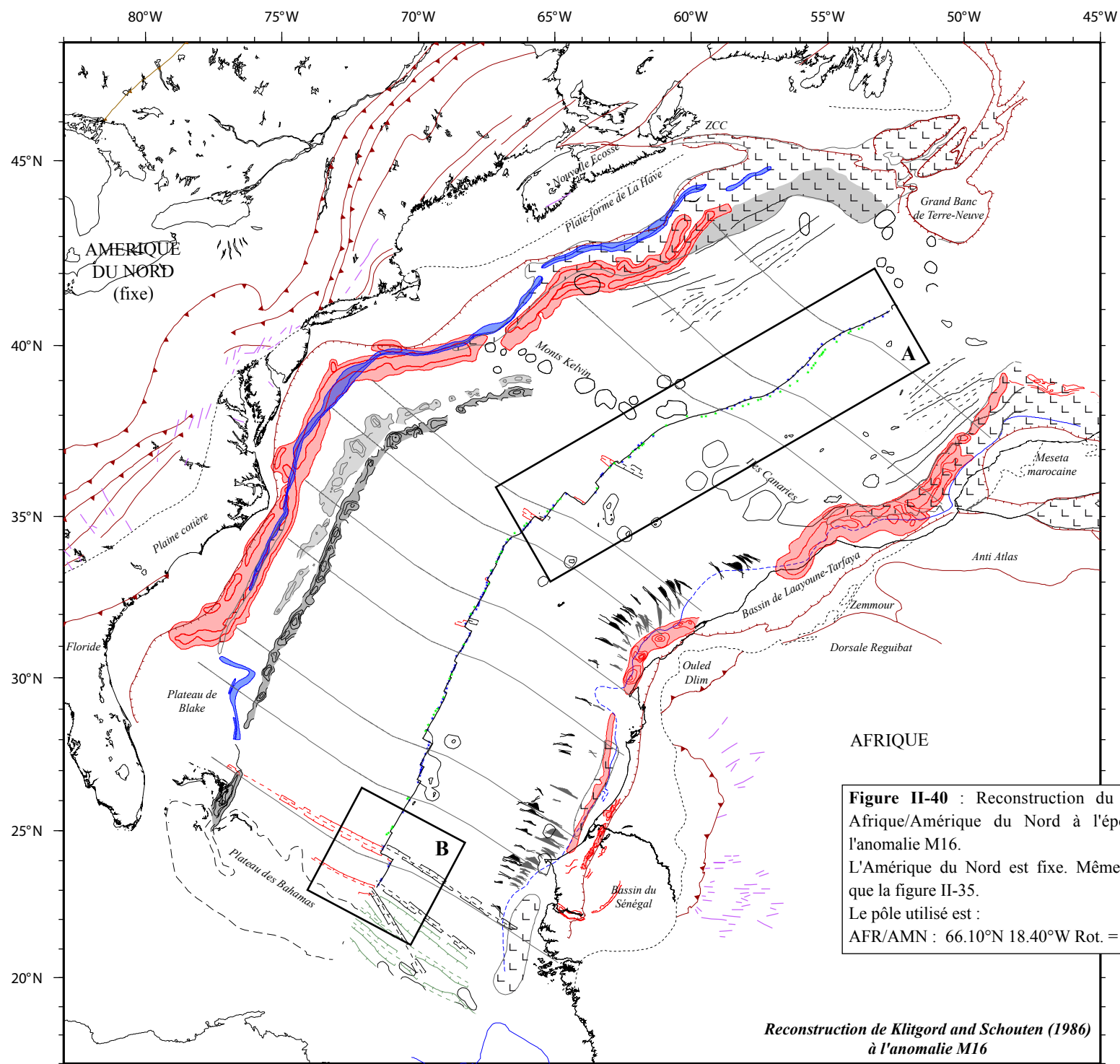


**Figure II-39** : Reconstruction du système Afrique/Meseta/Amérique du Nord à l'époque de l'anomalie M21 (148 Ma, Tithonien). La plaque Amérique du Nord est fixe. Même légende que la figure II-35. Les pôles utilisés sont :

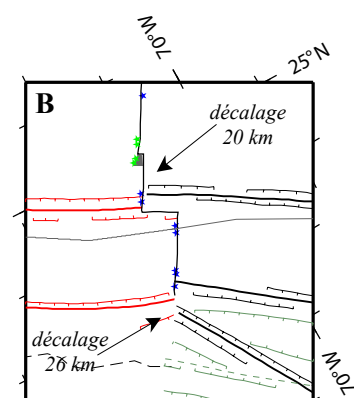
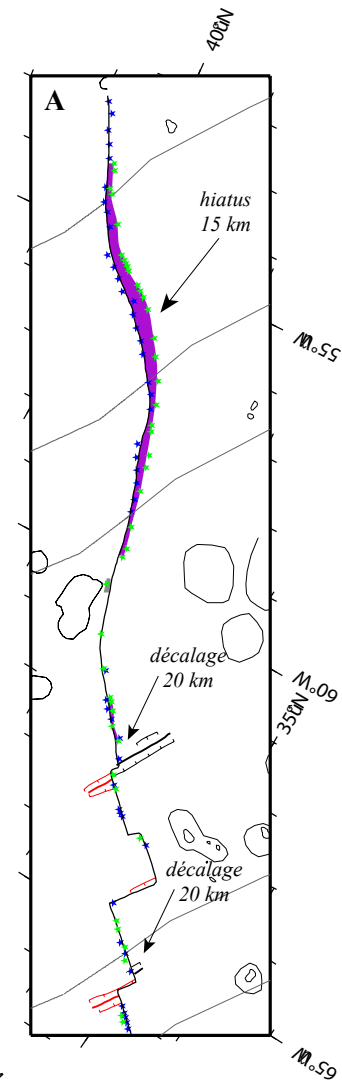
AFR/AMN : 66.00°N 18.70°W Rot. = -62.29°  
 MES/AMN : 66.64°N 17.65°W Rot. = -61.08°

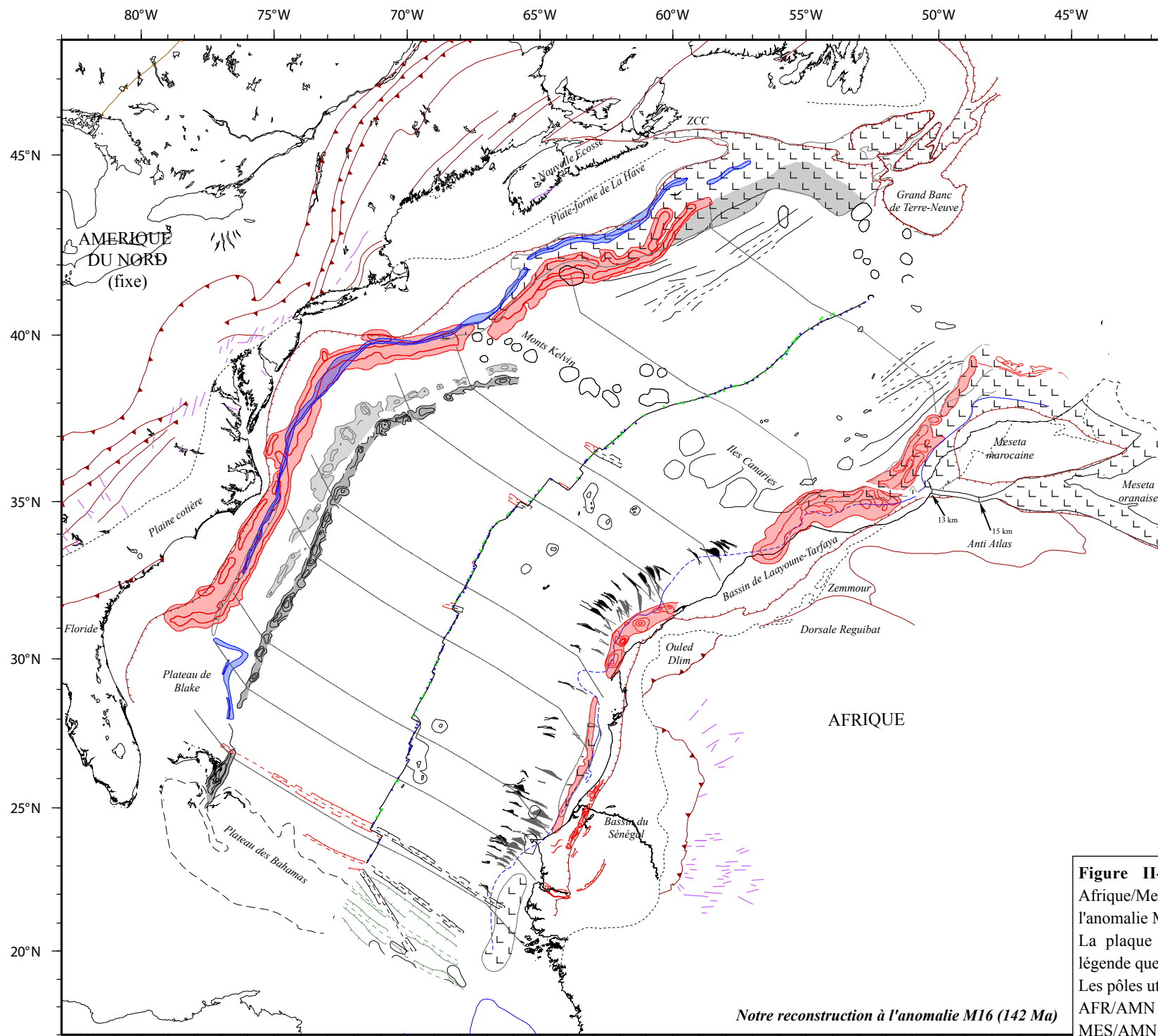
*Notre reconstruction à l'anomalie M21 (148 Ma)*





**Figure II-40 :** Reconstruction du système Afrique/Amérique du Nord à l'époque de l'anomalie M16. L'Amérique du Nord est fixe. Même légende que la figure II-35. Le pôle utilisé est : AFR/AMN : 66.10°N 18.40°W Rot. = -59.79°

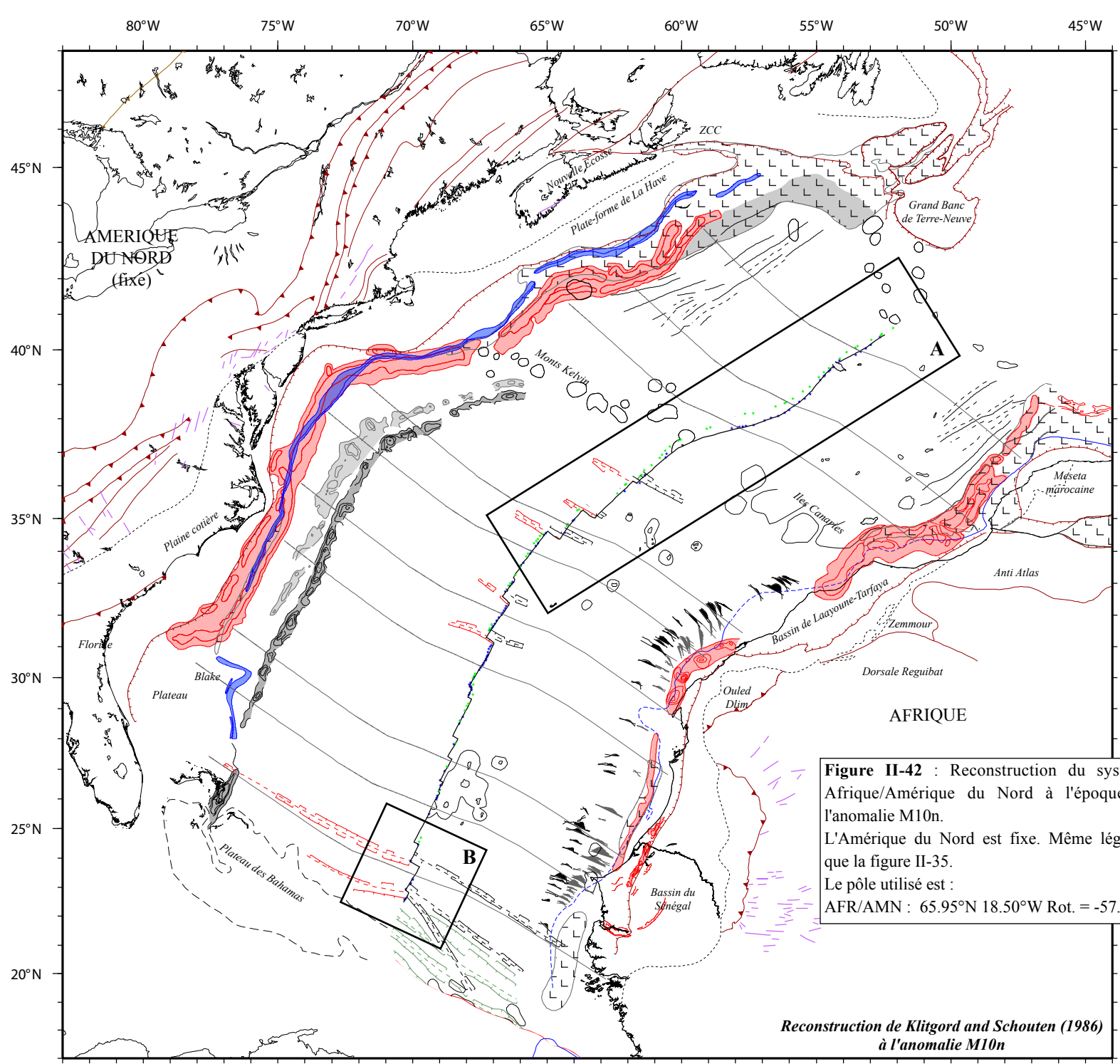




**Figure II-41** : Reconstruction du système Afrique/Meseta/Amérique du Nord à l'époque de l'anomalie M16 (142 Ma, Berriasien). La plaque Amérique du Nord est fixe. Même légende que la figure II-35. Les pôles utilisés sont :

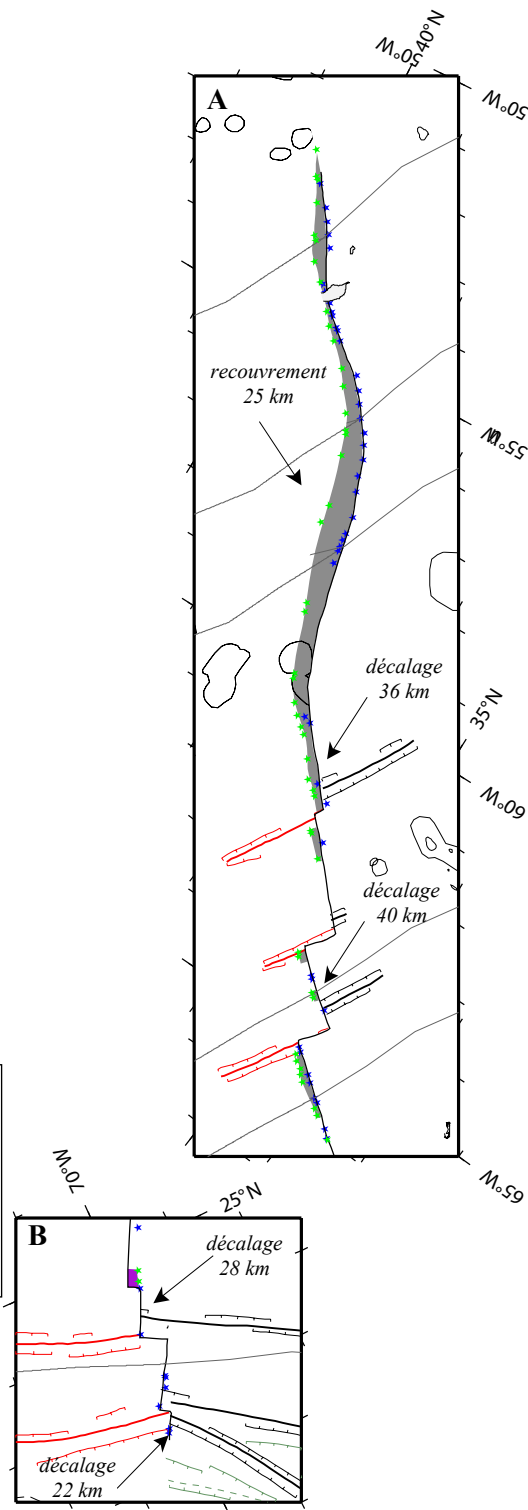
AFR/AMN : 66.57°N 18.08°W Rot. = -59.34°  
 MES/AMN : 66.71°N 17.62°W Rot. = -59.08°

*Notre reconstruction à l'anomalie M16 (142 Ma)*

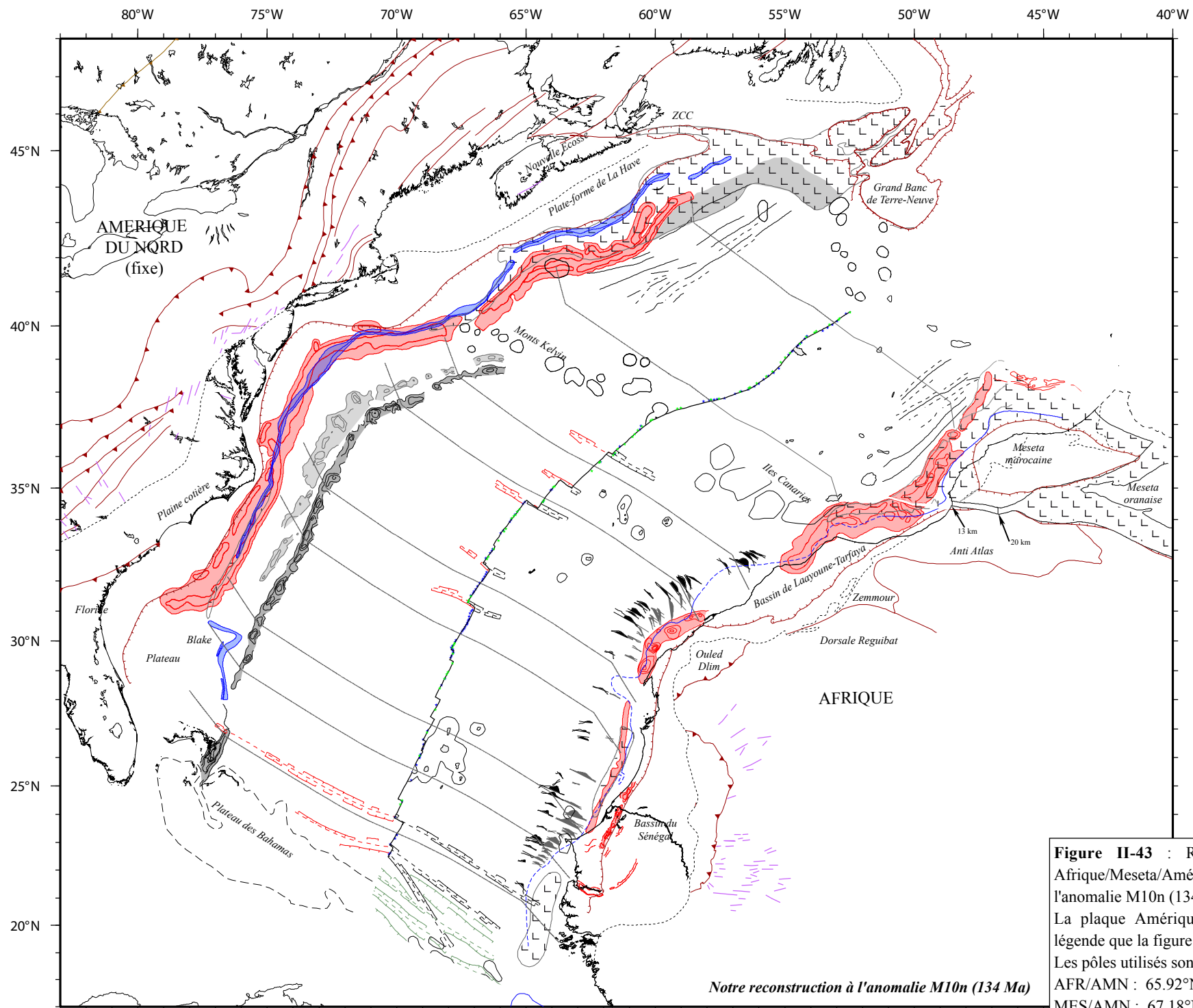


**Figure II-42 : Reconstruction du système Afrique/Amérique du Nord à l'époque de l'anomalie M10n.**  
 L'Amérique du Nord est fixe. Même légende que la figure II-35.  
 Le pôle utilisé est :  
 AFR/AMN : 65.95°N 18.50°W Rot. = -57.40°

*Reconstruction de Klitgord and Schouten (1986) à l'anomalie M10n*



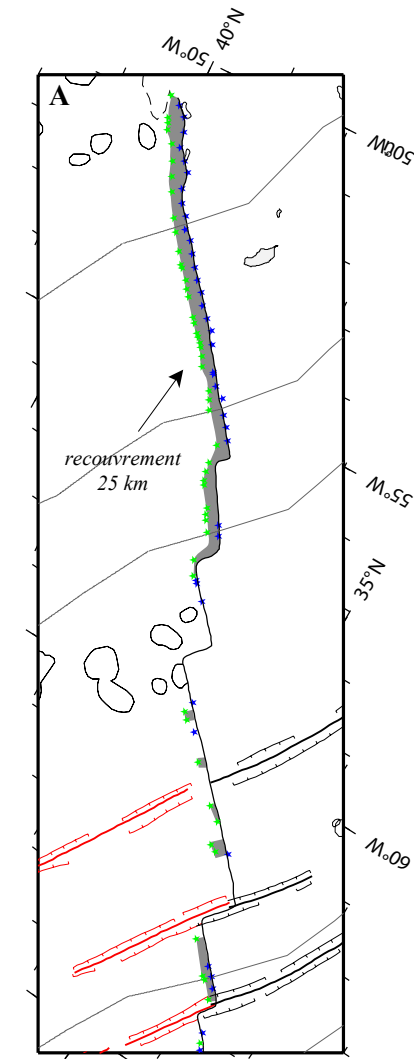
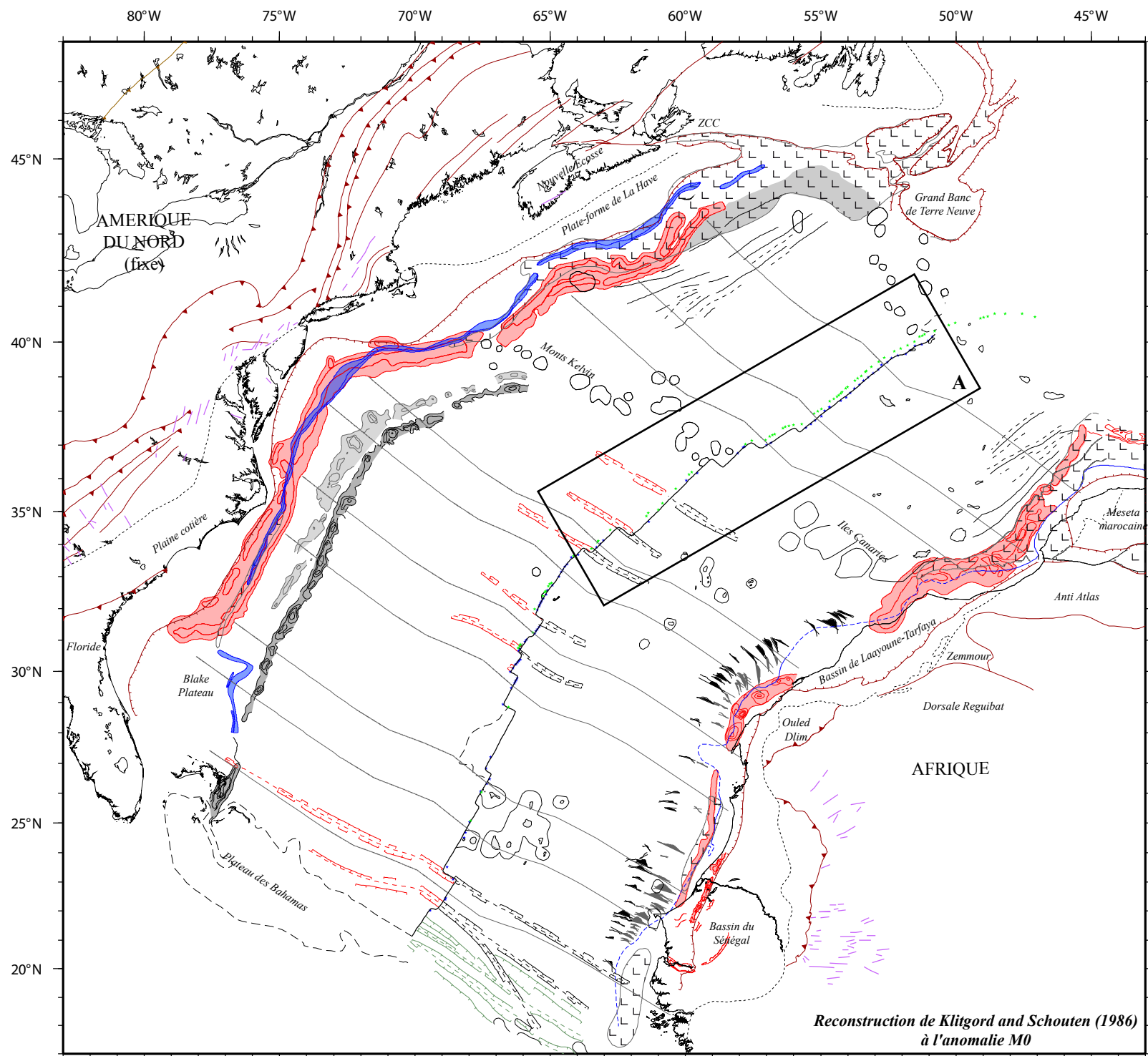




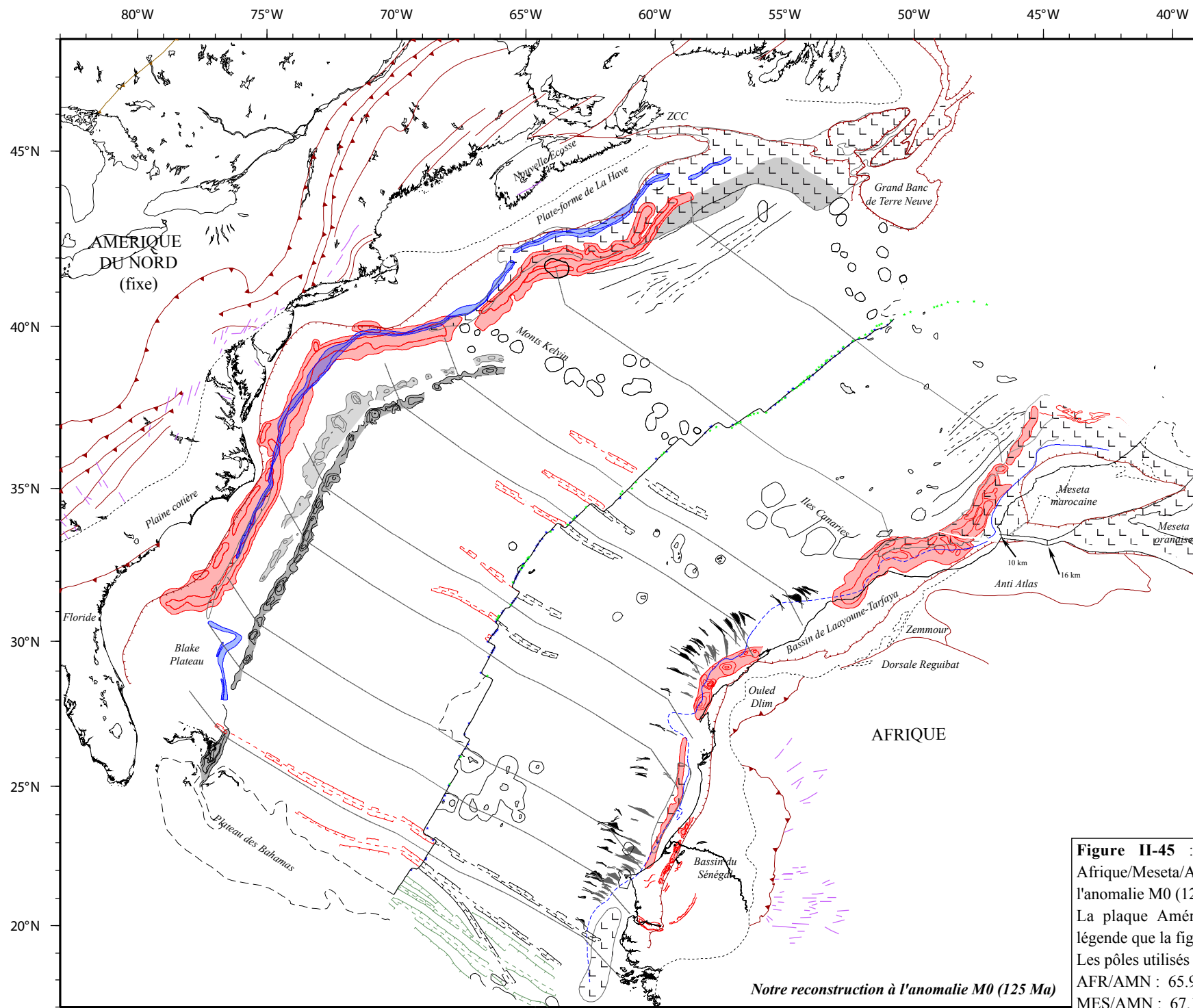
**Figure II-43** : Reconstruction du système Afrique/Meseta/Amérique du Nord à l'époque de l'anomalie M10n (134 Ma, Hautérvien). La plaque Amérique du Nord est fixe. Même légende que la figure II-35. Les pôles utilisés sont :

AFR/AMN : 65.92°N 19.24°W Rot. = -57.55°

MES/AMN : 67.18°N 18.02°W Rot. = -55.86°



**Figure II-44 :** Reconstruction du système Afrique/Amérique du Nord à l'époque de l'anomalie M0. L'Amérique du Nord est fixe. Même légende que la figure II-35. Le pôle utilisé est : AFR/AMN : 66.30°N 19.90°W Rot. = -54.25°



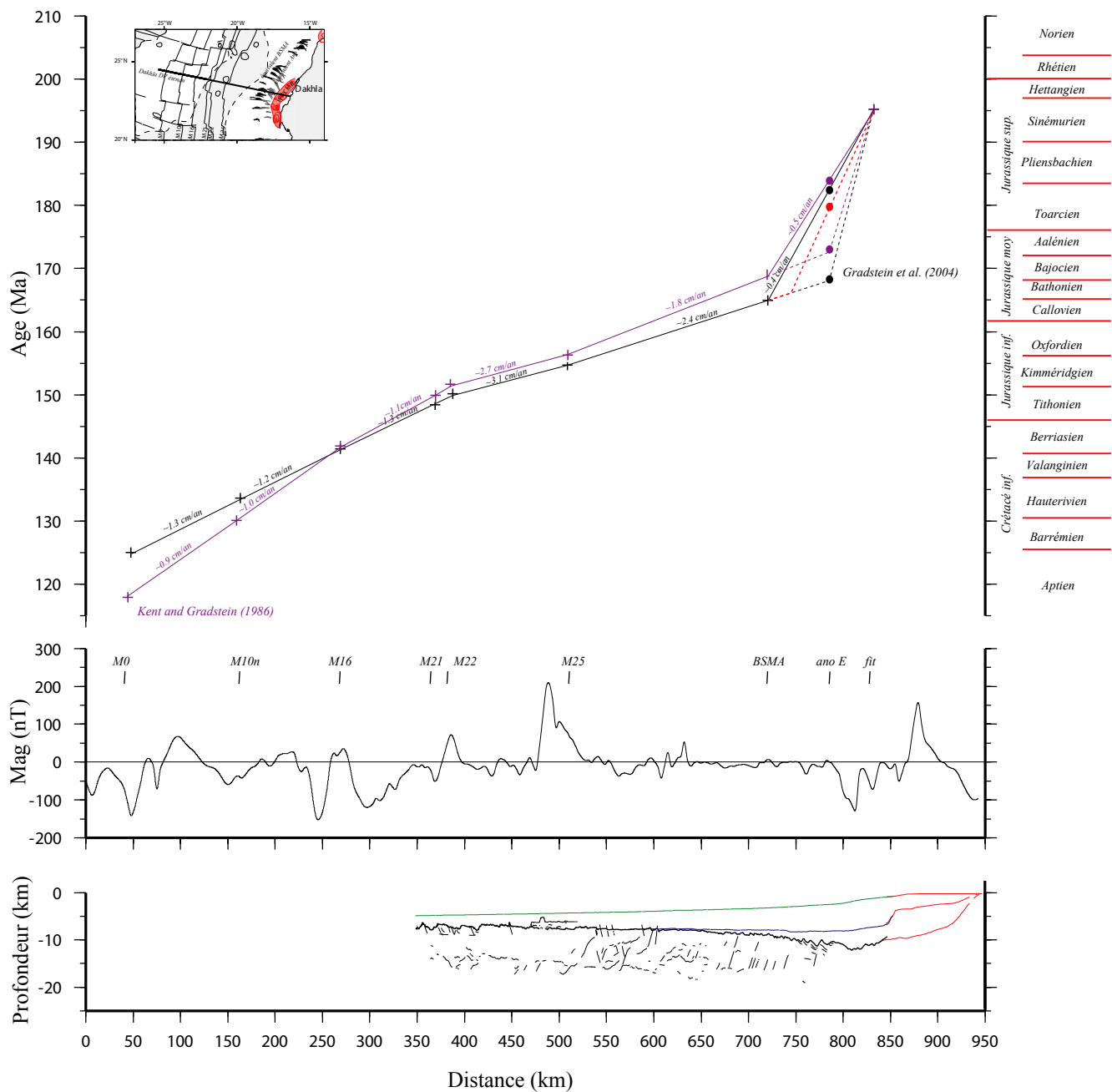
**Figure II-45** : Reconstruction du système Afrique/Meseta/Amérique du Nord à l'époque de l'anomalie M0 (125 Ma, limite Barrémien-Aptien). La plaque Amérique du Nord est fixe. Même légende que la figure II-35.

Les pôles utilisés sont :

AFR/AMN : 65.95°N 20.46°W Rot. = -54.56°

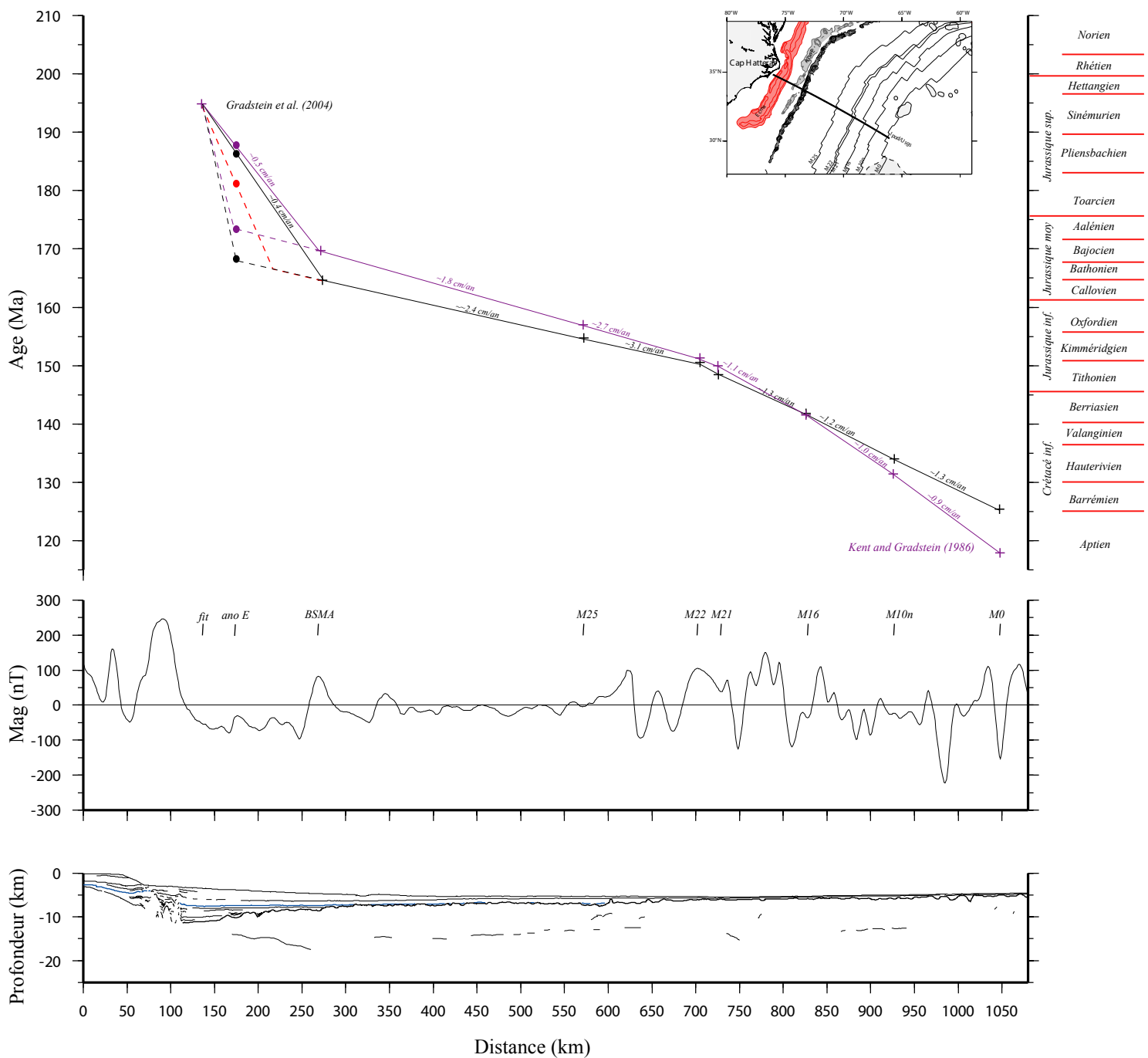
MES/AMN : 67.17°N 19.51°W Rot. = -53.01°





**Figure II-46 :** Comparaison entre le *line-drawing* du profil Dakhla DP, les anomalies magnétiques échantillonnées le long du profil extrapolé jusqu'à l'anomalie M0 et les échelles chronomagnétiques de Kent and Gradstein (1986) et Gradstein *et al.* (2004). Les demi-taux sont ici considérés symétriques.

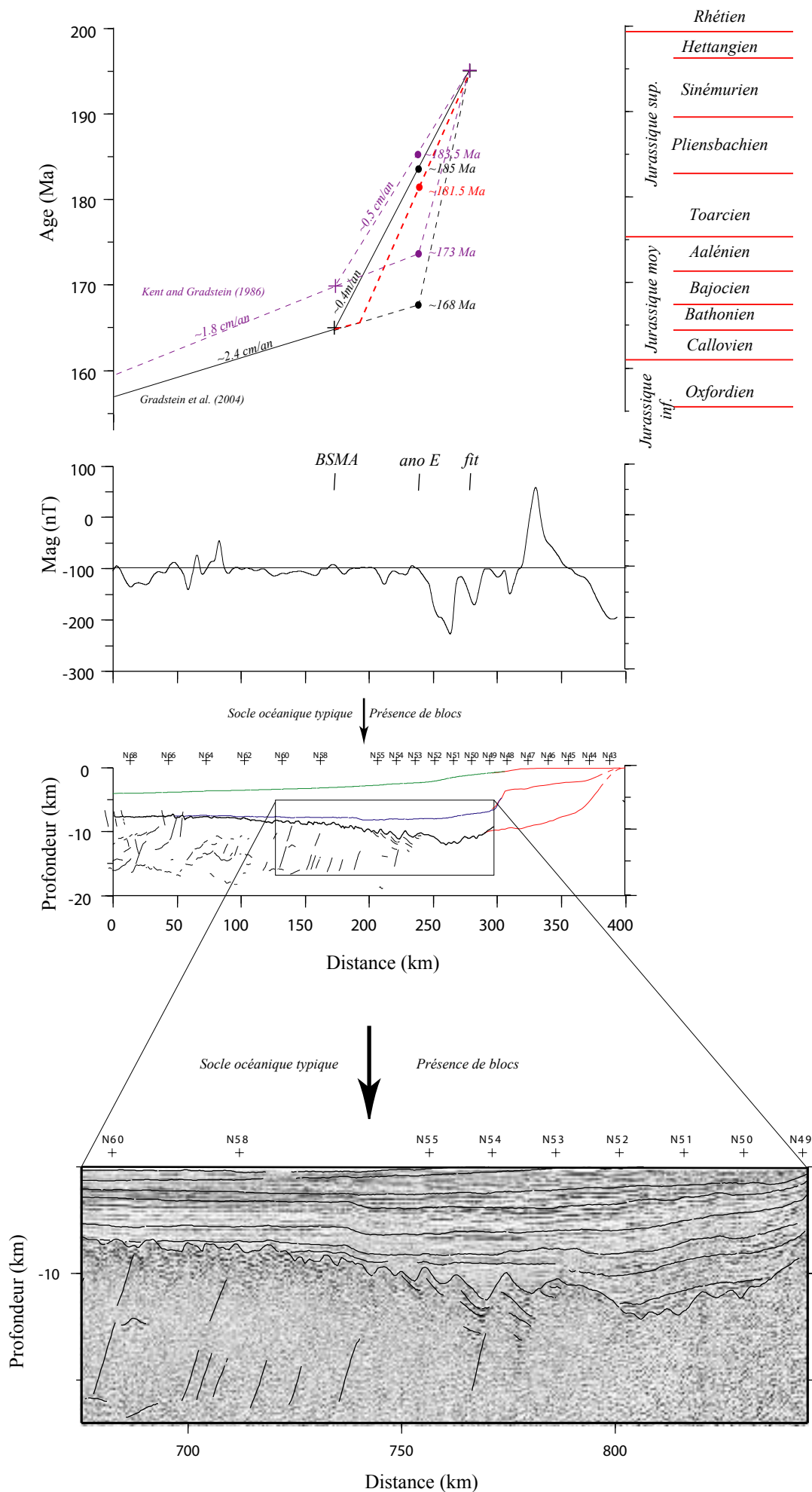
A noter un demi-taux d'expansion initial très faible ( $\sim 0,4$  cm/an, Gradstein *et al.*, 2004), une accélération de l'ouverture océanique à partir de la BSMA ( $\sim 2,4$  cm/an) et enfin une diminution au niveau de l'anomalie M22 ( $\sim 1,3$  cm/an).



**Figure II-47** : Comparaison entre le *line-drawing* du profil Ipod-USgs, les anomalies magnétiques échantillonnées le long du profil et les échelles chronomagnétiques de Kent and Gradstein (1986) et Gradstein *et al.* (2004). Les taux d'accrétion sont des demi-taux d'ouverture.

A titre de comparaison, les valeurs des taux d'accrétion issues du travail de Klitgord and Schouten (1986), calculés à partir de l'échelle chronomagnétique de Kent and Gradstein (1986) sont :

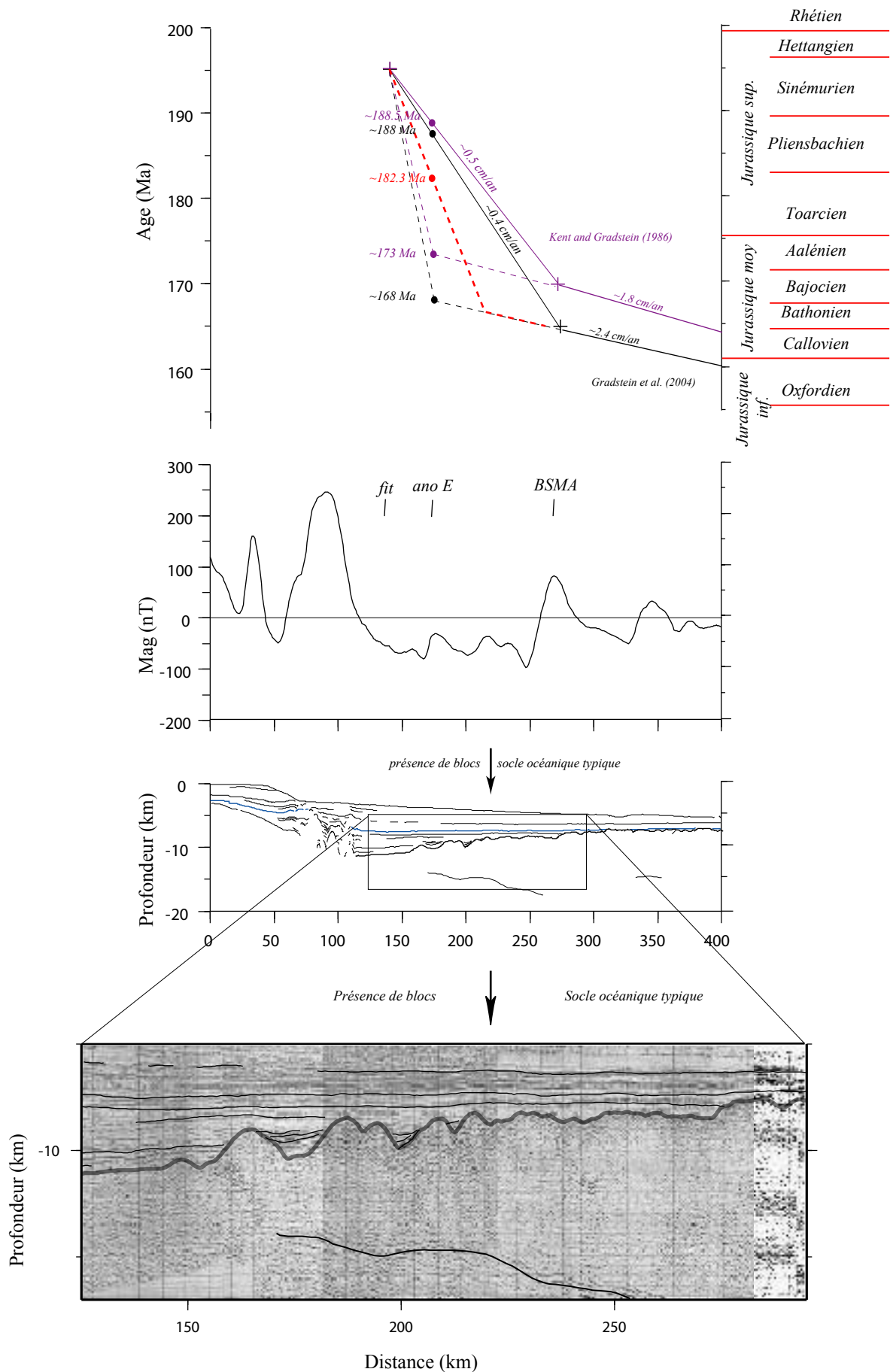
ECMA-M21 = 1,9 cm/an, M21-M16 = 1,0 cm/an, M16-M10n = 0,7 cm/an, M10n-M0 = 0,9 cm/an.



**Figure II-48 :** Zoom, côté africain, sur les phases initiales de l'ouverture de l'océan Atlantique Central : relation entre vitesse d'ouverture et morphologie du socle. L'âge attribué à l'anomalie E dépend directement des hypothèses retenues, nous la situons aux alentours de 182 Ma.

N60 + marque la position des OBS



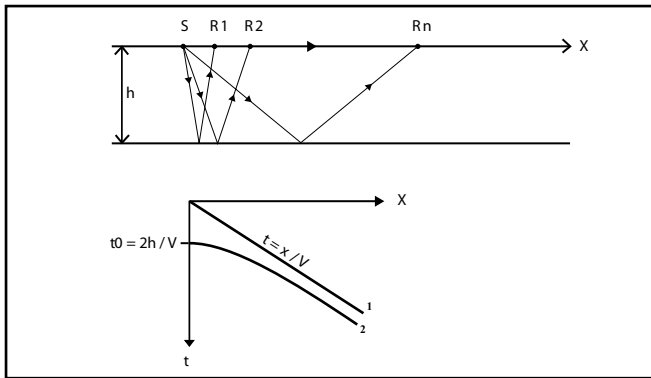


**Figure II-49** : Zoom, côté américain, sur les phases initiales de l'ouverture de l'océan Atlantique Central : relation entre vitesse d'ouverture et morphologie du socle. L'âge attribué à l'anomalie E dépend directement des hypothèses retenues, nous la situons aux alentours de 182 Ma.

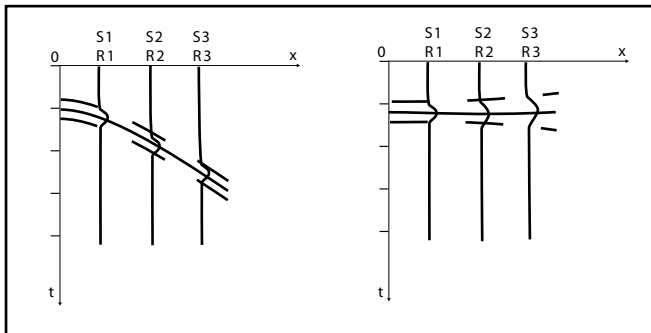
Chapitre III

## Etude structurale

## SISMIQUE REFLEXION

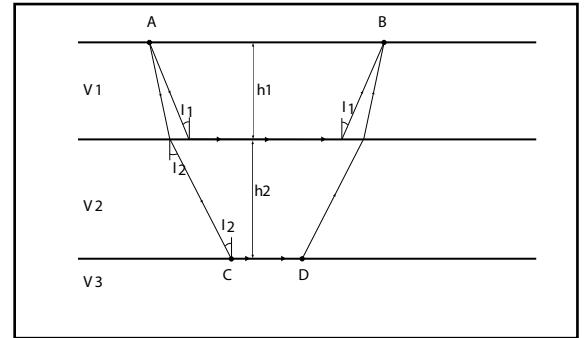


**A** : En haut, principe de la sismique-réflexion. La source est située en S, la détection des ondes se fait sur les récepteurs  $R_1, R_2, \dots, R_n$ . Les rayons sismiques sont représentés en supposant un milieu homogène.  
En bas, hodochrone des événements sismiques dans l'hypothèse d'un réflecteur horizontal dans un milieu homogène. L'onde directe (1) permet de déduire la vitesse du milieu traversé et l'onde réfléchie (2) permet de calculer la profondeur du milieu en  $X=0$  avec la formule  $t_0 = 2h / V$ .

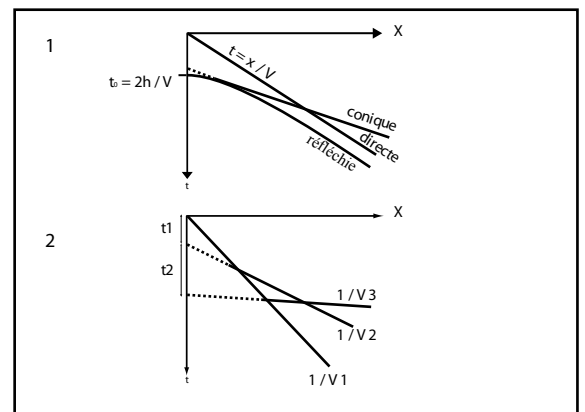


**B** : Exemple de corrections dynamiques (NMO) sur un tir, les traces seront ensuite sommées pour améliorer et renforcer le rapport signal/bruit.  $S_1, S_2, \dots$  correspondent aux différentes sources et  $R_1, R_2, \dots$  aux différents récepteurs.

## SISMIQUE REFRACTION



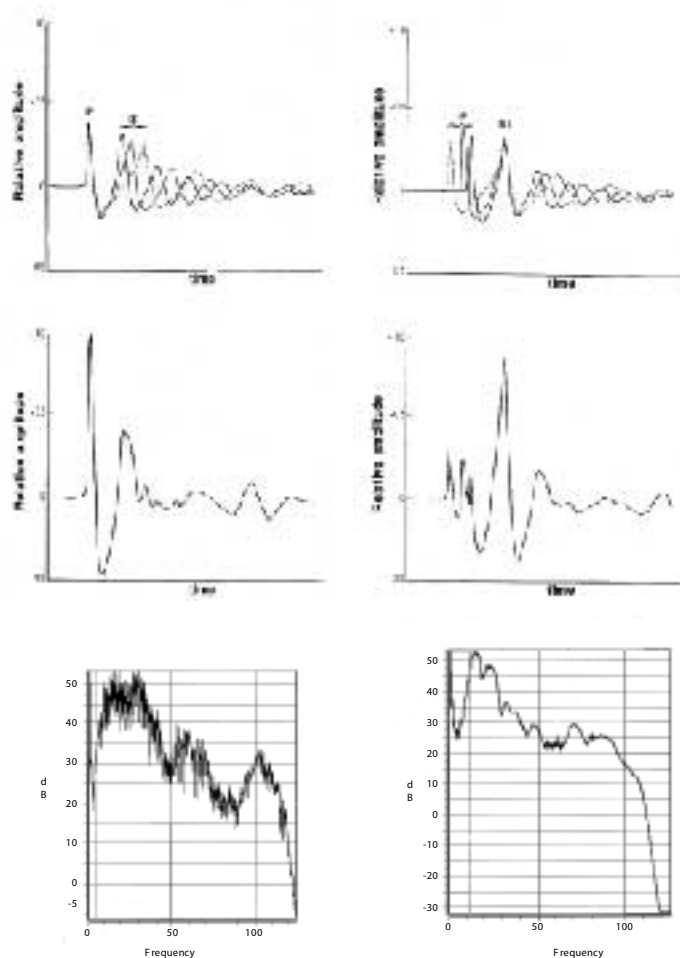
**C** : Principe de la sismique réfraction, où l'on reçoit les ondes à une distance de la source plus grande que la distance critique  $x_1$ . Cas le plus simple des milieux à couches parallèles, à une ou plusieurs couches.



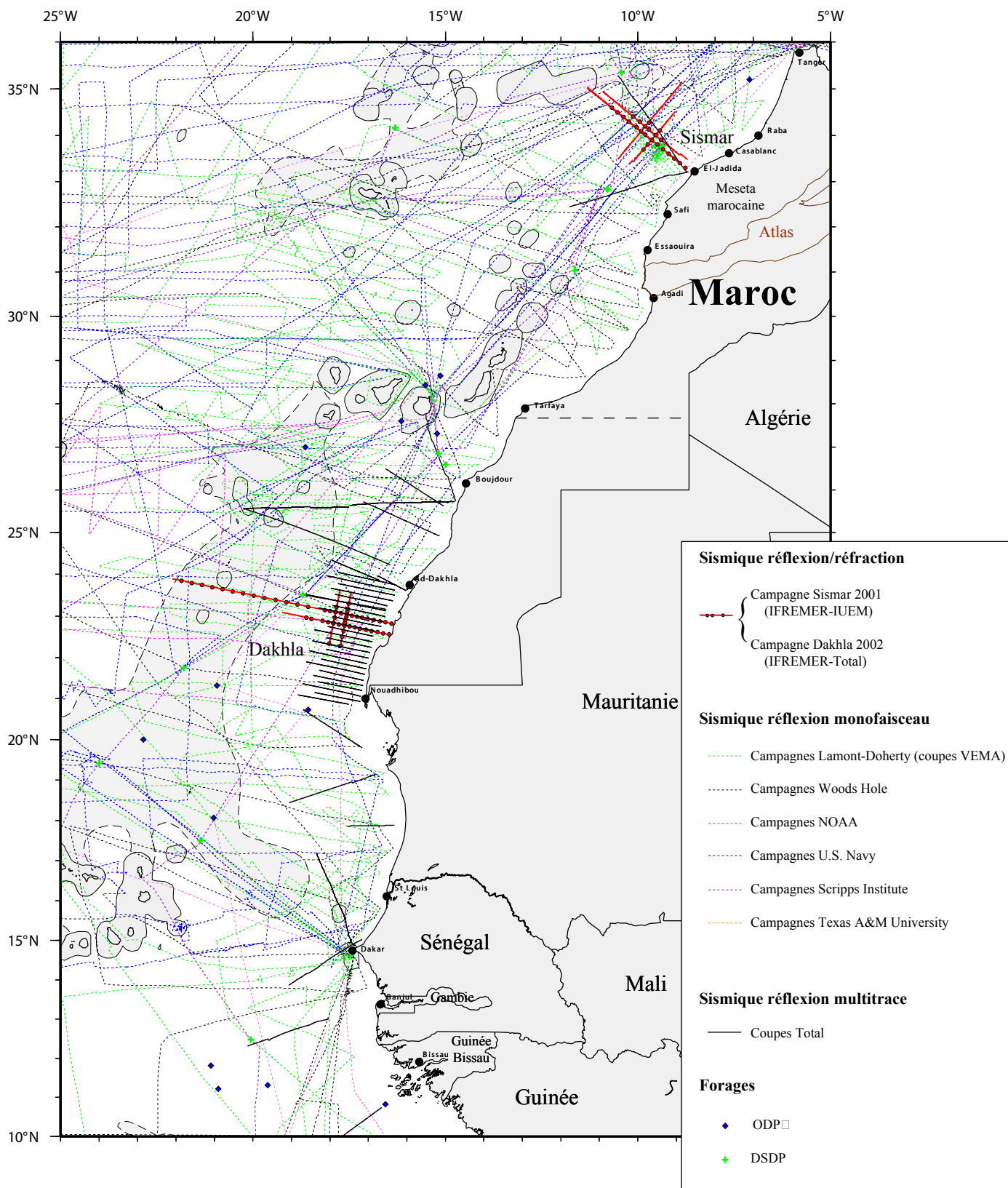
**D** : (1) Hodochrone dans le cas d'un milieu à une couche d'épaisseur constante, d'onde directe, réfléchie et conique ou réfractée.  
(2) Hodochrone des ondes directes et réfractées d'un milieu à deux couches parallèles sur un substratum (vitesses  $V_1, V_2, V_3$ )

**Figure III-1** : Rappels sur les principes fondamentaux utilisés en sismique réflexion et réfraction.

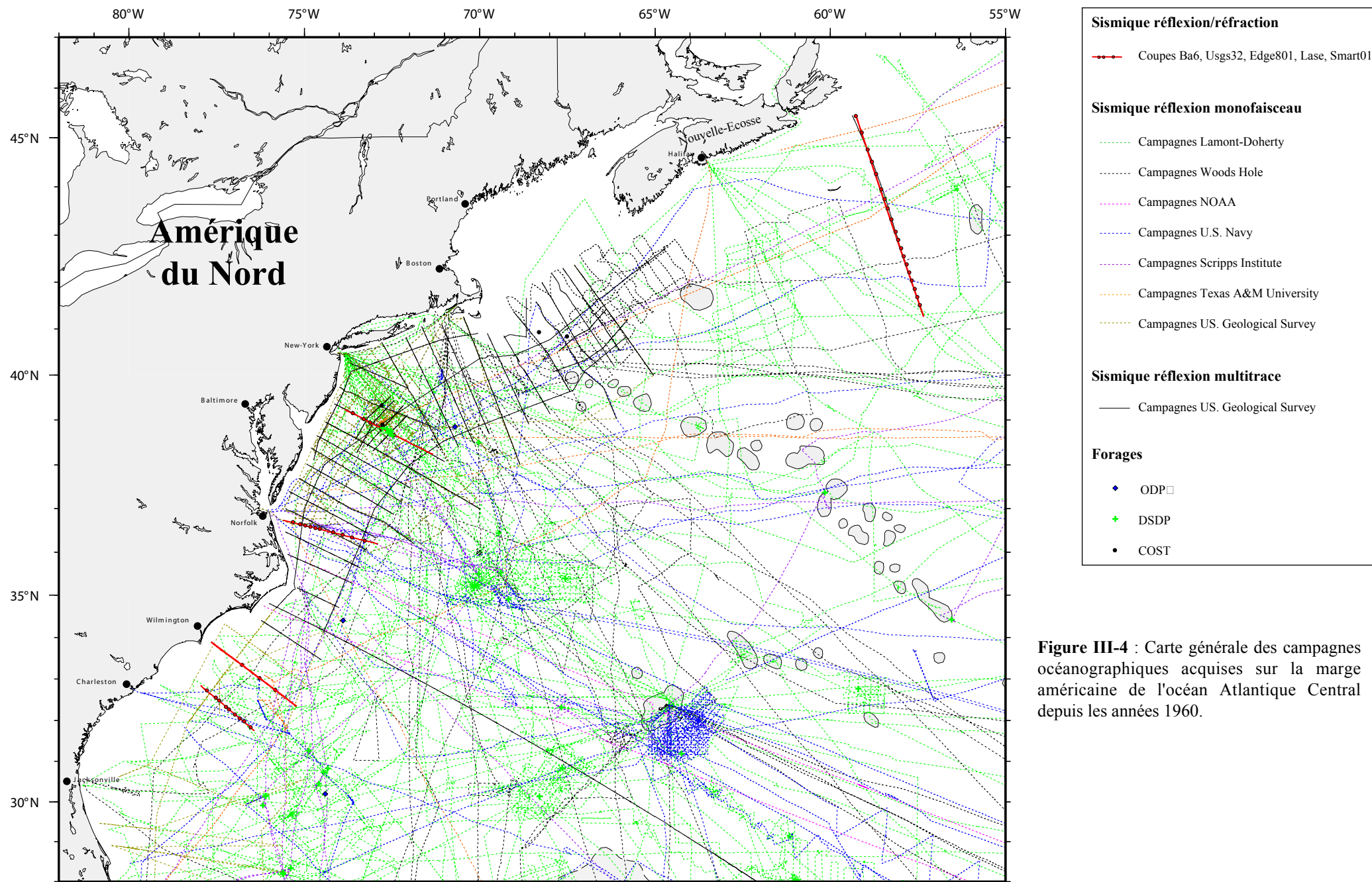




**Figure III-2** : Comparaison entre un système synchronisé sur le premier pic (à gauche) et un système synchronisé sur la première oscillation "monobulle" (à droite) (Avedik *et al.*, 1993). En bas, on montre la comparaison entre les deux spectres d'amplitude des deux systèmes. Elle montre que le spectre de la source "premier pic" est plus large (10-40 Hz) que celui du système monobulle (10-25 Hz) et surtout plus haute fréquence (Nouzé *et al.*, 2000, rapport interne IFREMER).

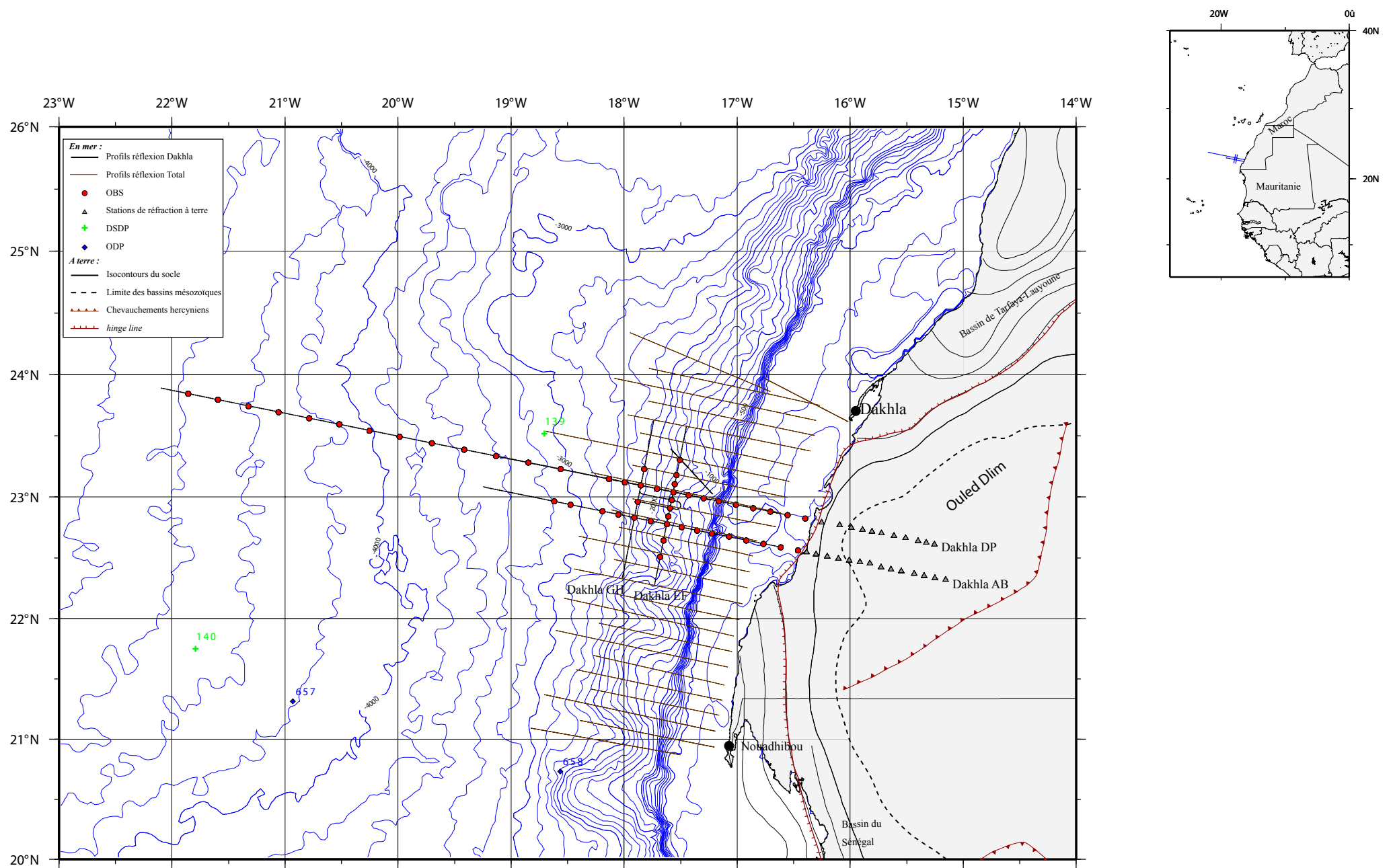


**Figure III-3 :** Carte générale des campagnes océanographiques acquises sur la marge africaine de l'océan Atlantique Central depuis les années 1960.



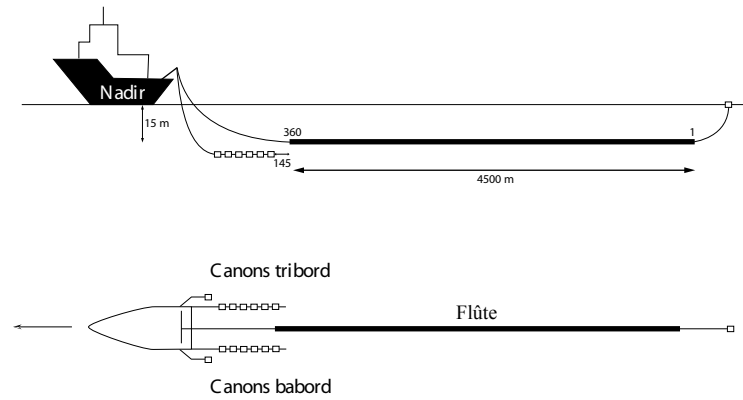
**Figure III-4** : Carte générale des campagnes océanographiques acquises sur la marge américaine de l'océan Atlantique Central depuis les années 1960.



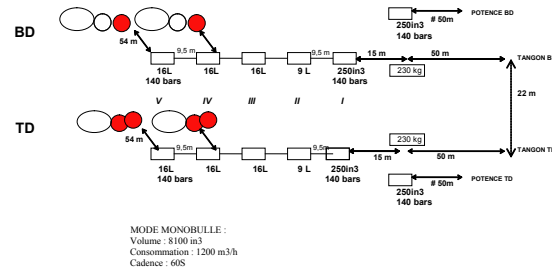


**Figure III-5 :** Plan de position de la campagne Dakhla, avec les profils de sismique réflexion (en noir) sur fond bathymétrique (données satellitaires de Smith and Sandwell, 1997) (équidistance 200 m dans la plaine abyssale, 50 m depuis la ligne de côte jusqu'à l'isobathe 500 m) et le positionnement de stations de réfraction en mer (cercles rouges) et à terre (triangles gris).

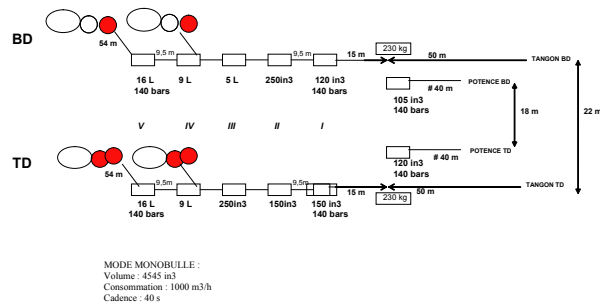
### Paramètres d'acquisition



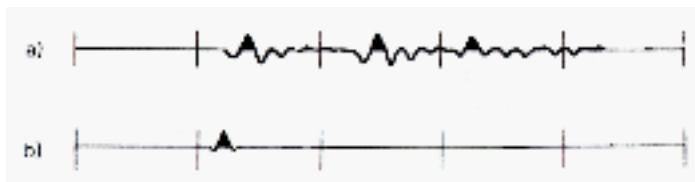
### La source "Grosse Bertha"



### La source "Bulle"

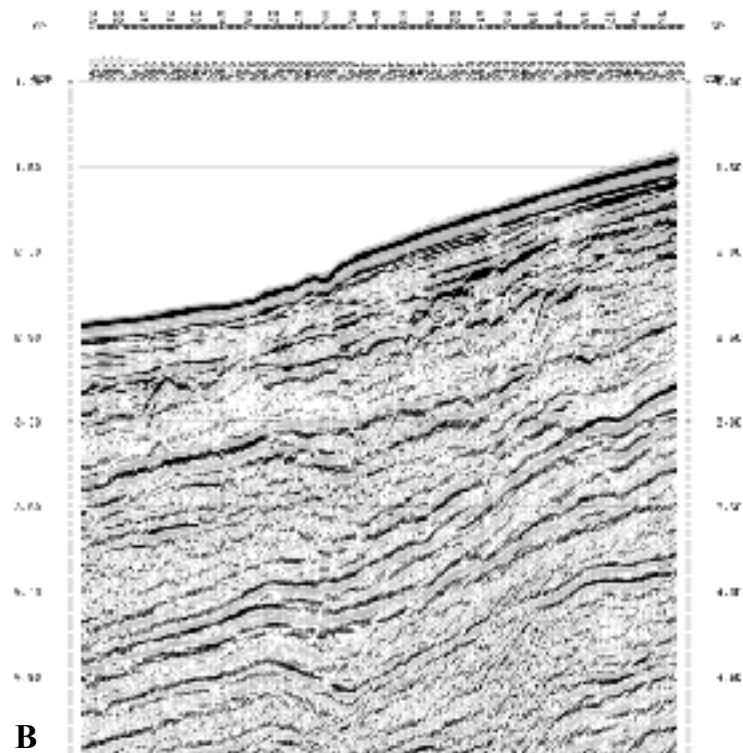
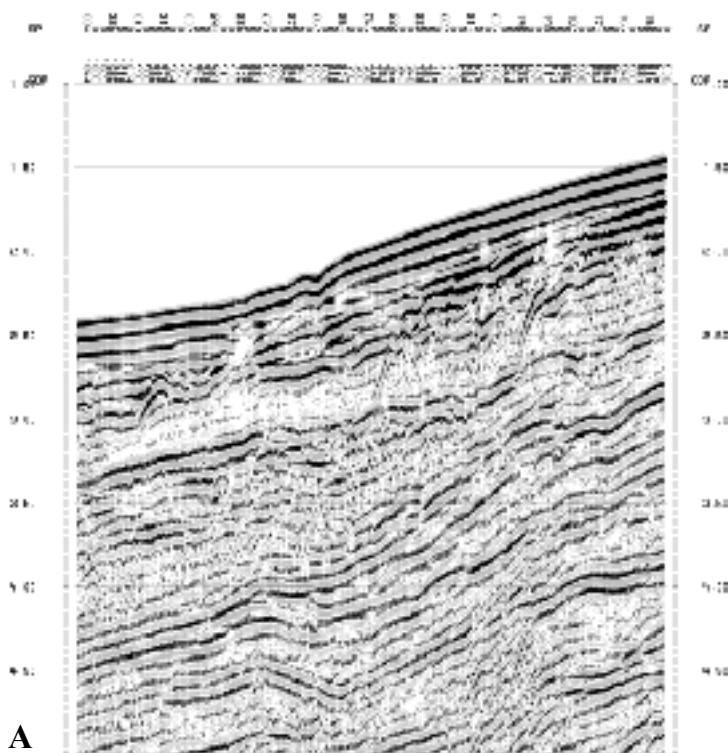


**Figure III-6** : Paramètres et géométrie de la flûte et de la source utilisées lors de la campagne Dakhla SMT (novembre-décembre 2002)



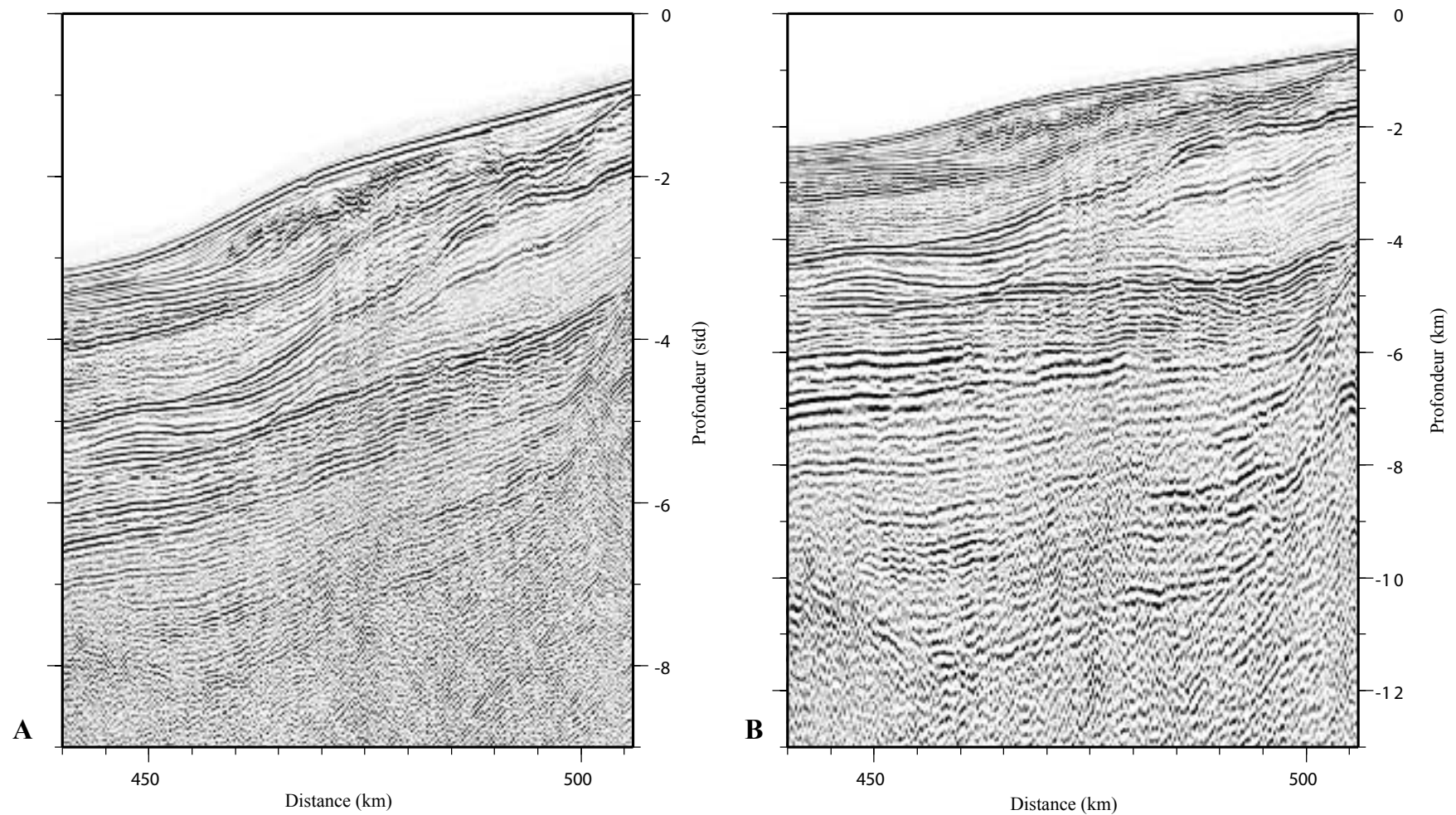
Déconvolution du signal émis:

- a) Impulsion initiale: impulsion brève suivi de 2 rebonds
- b) Impulsion déconvoluée

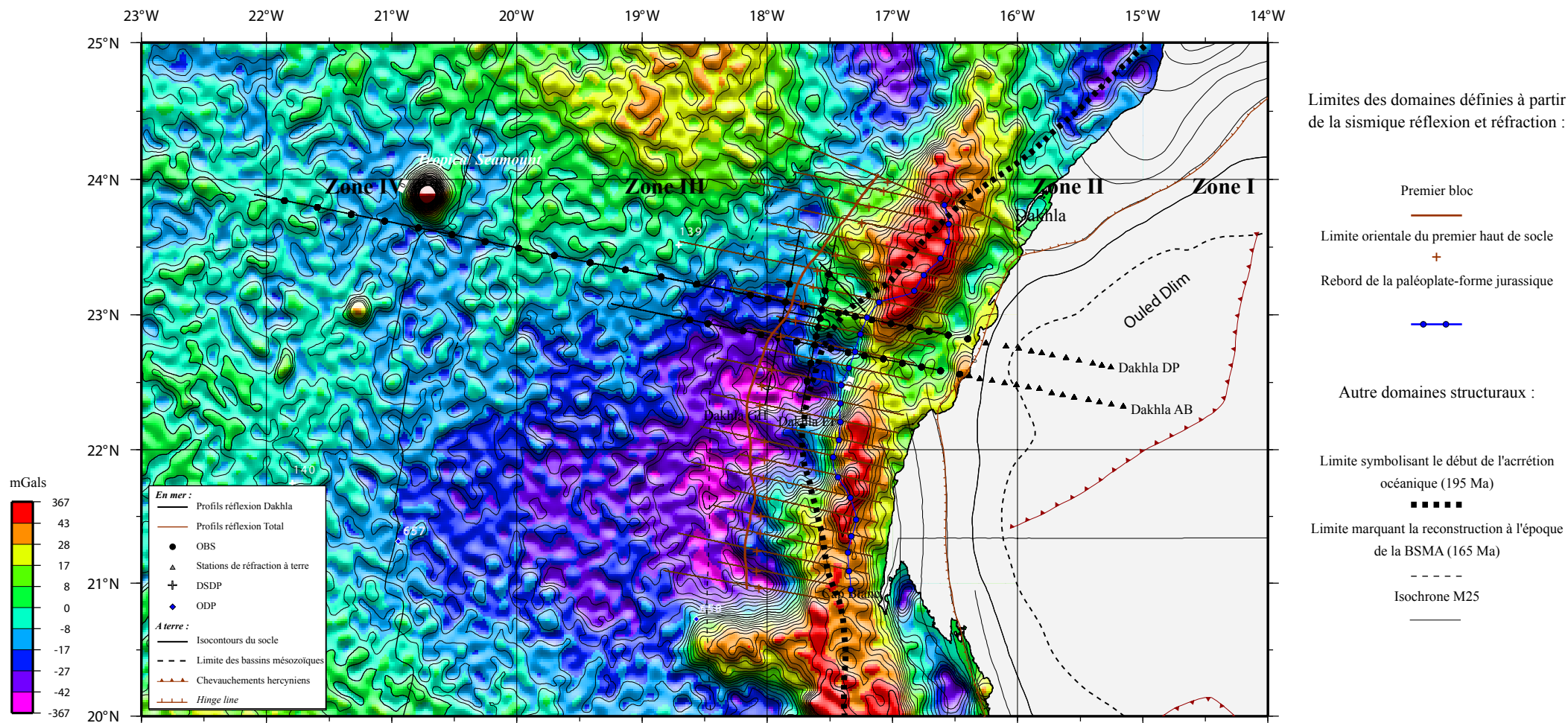


**Figure III-7** : Exemple de déconvolution pour une section du profil Dakhla (profil AB). La figure A est une portion du profil AB, stacké et non déconvolué. La figure B correspond à la même portion de profil, déconvolué avec le logiciel Géovecteur, par une méthode statistique (module DECONV) (Cosquer, 2004, rapport interne IFREMER).

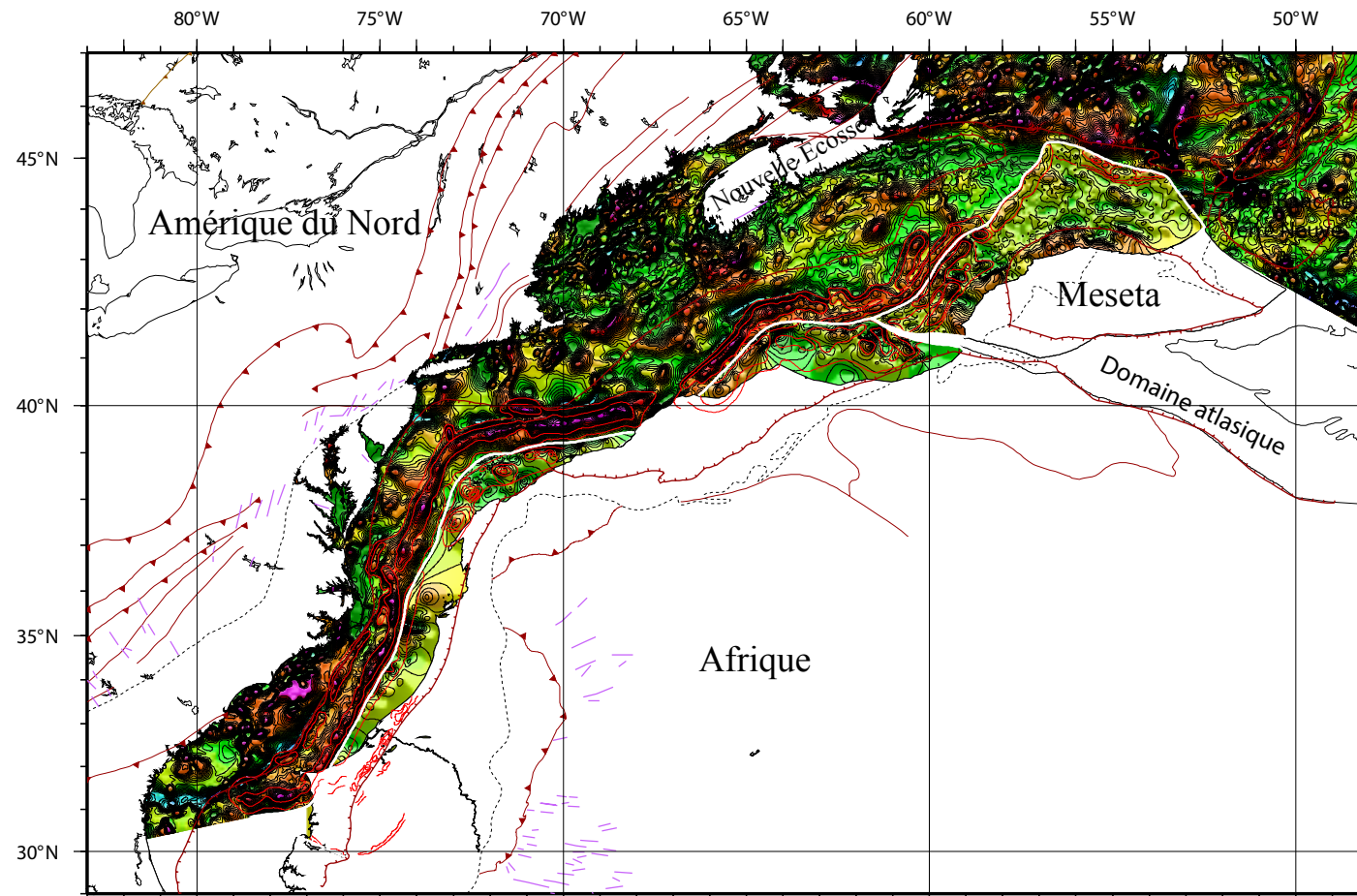




**Figure III-8 :** Exemple de migration pour une section du profil Dakhla (profil DP). La figure A est une portion du profil DP, stacké et non migré. La figure B correspond à la même portion de profil, migré avec le logiciel Sisbise en utilisant les vitesses obtenues à partir du modèle de réfraction. Notons que les réflecteurs qui apparaissent pentés sur la figure A retrouvent une géométrie réelle plane sur la figure B.

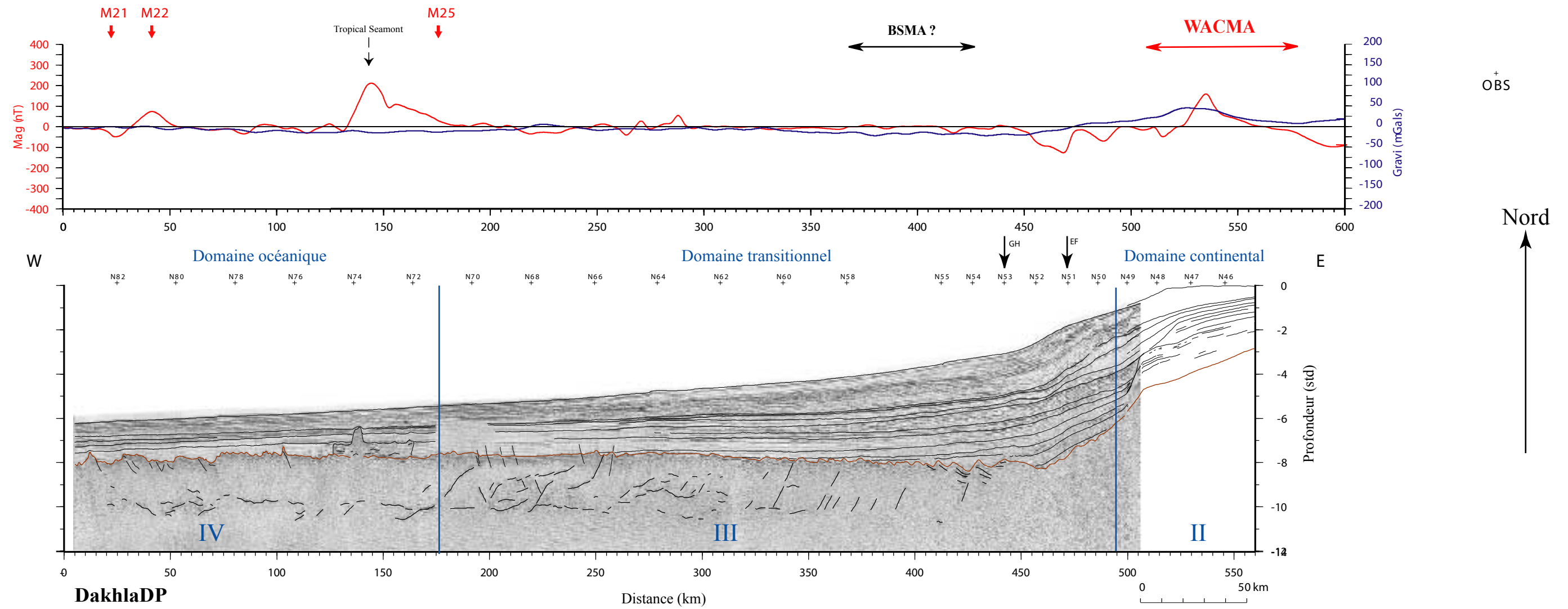


**Figure III-9 :** Carte gravimétrique d'après la grille gravimétrique (1 min\*1 min) de Sandwell and Smith (1997) de la marge située au large de Dakhla. La marge est caractérisée par une forte anomalie gravimétrique, qui épouse la forme de la ligne de côte. L'amplitude de cette anomalie est minimale au niveau de la zone d'étude Dakhla.

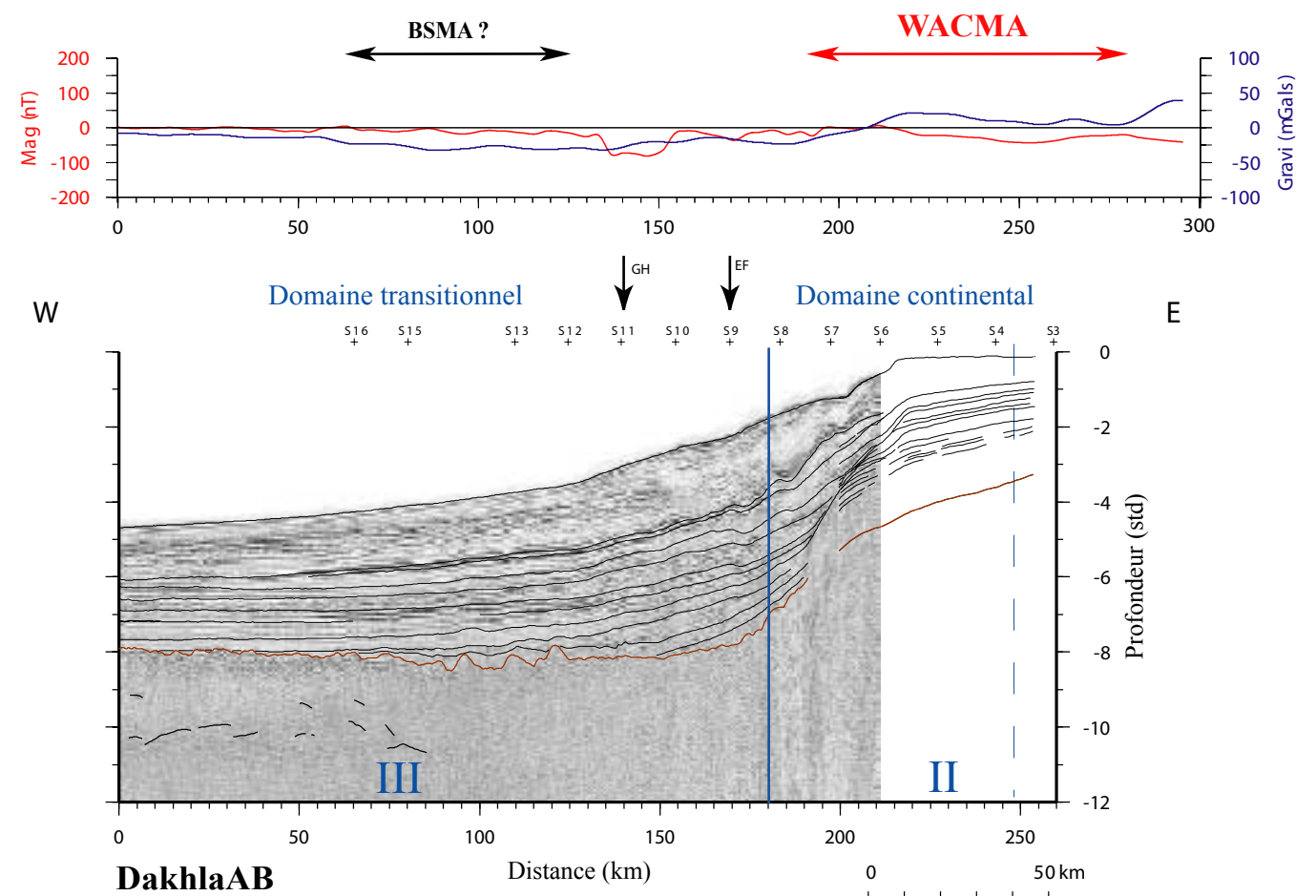


**Figure III-10** : Reconstitution initiale dans l'océan Atlantique Central au Sinémurien (195 Ma) selon les paramètres de rotation de Sahabi (2004) et Sahabi *et al.* (2004). Les cartes des anomalies magnétiques contourées des plaques Amérique et Ibérie (Verhoef *et al.*, 1996) et Afrique (ce travail) ont été découpées selon l'ajustement initial (trait blanc). Les anomalies bordières ECMA et WACMA sont représentées par les traits rouges. Entre la Meseta et la Nouvelle-Ecosse, les anomalies bordières s'ajustement remarquablement bien. Elles se chevauchent entre 40°N et 41.5°N. Au niveau du segment central, la reconstitution montre un hiatus, la limite matérialisant l'ajustement initial passe au bas du gradient. Les anomalies du segment Sud se juxtaposent parfaitement.

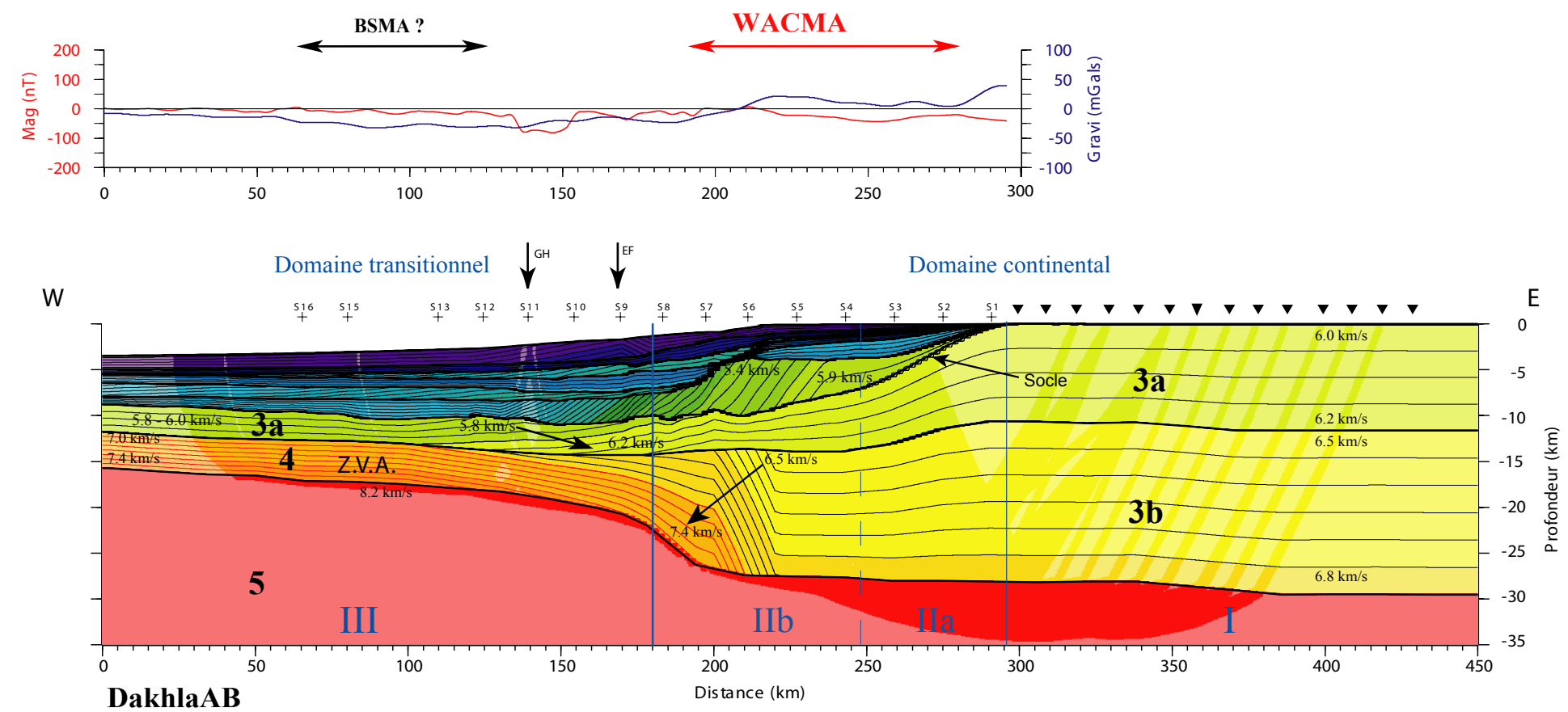
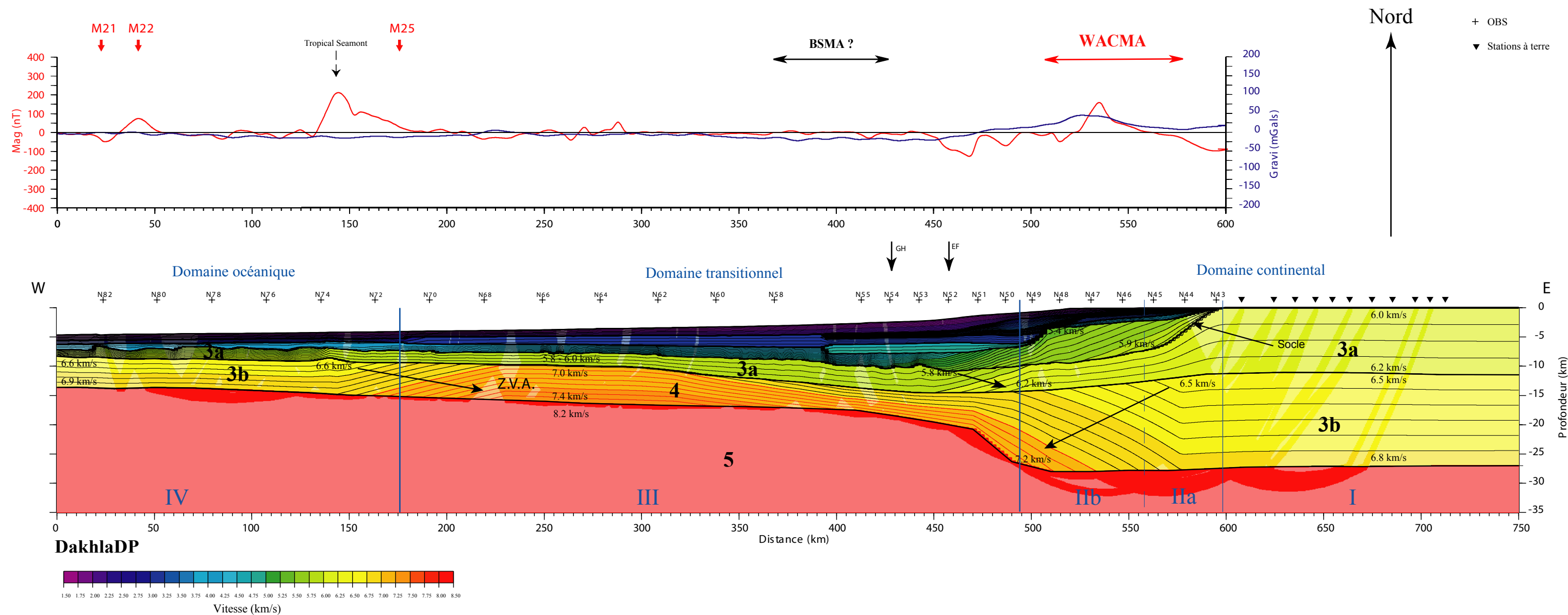




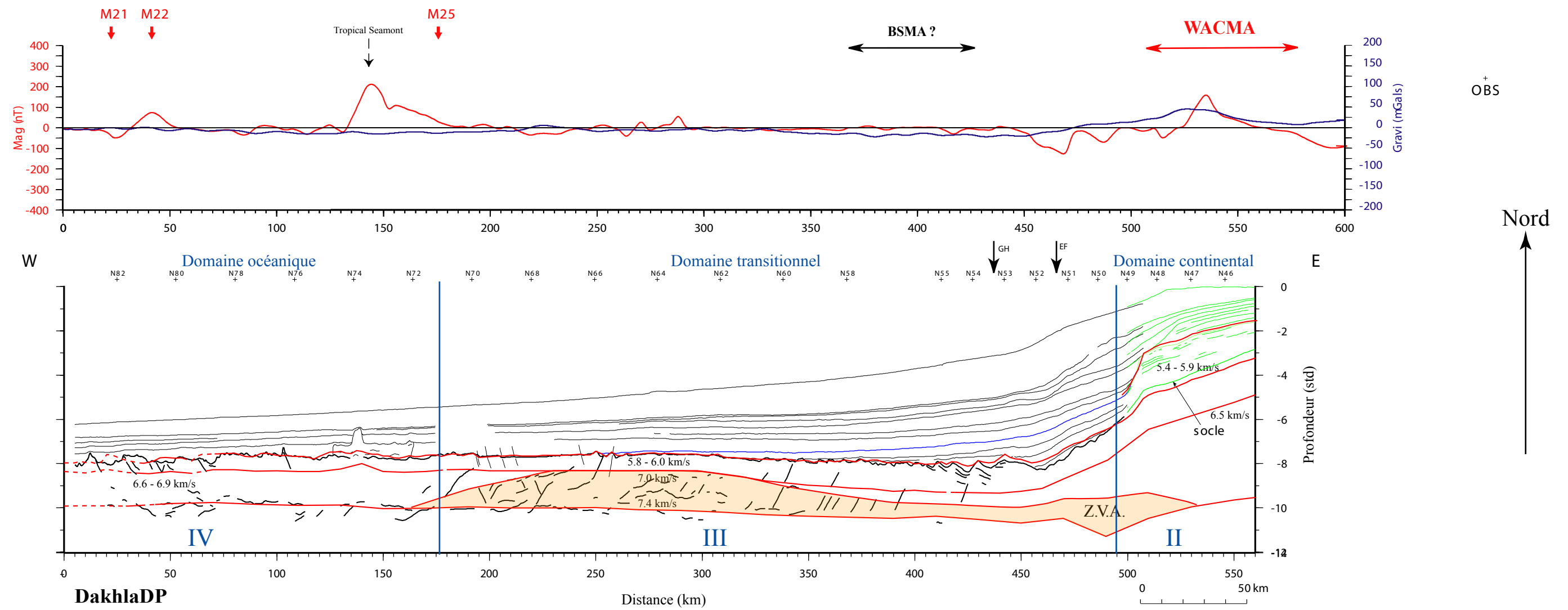
**Figure III-11** : Les deux profils de sismique réflexion perpendiculaires à la marge, implantés du Nord (en haut) au Sud (en bas). Ils montrent les trois domaines (continental, transitionnel, océanique) définis sur la marge africaine au large de Dakhla. La marge est découpée en différentes zones (II, III, IV) définies à partir des données sismiques réflexion et réfraction et des données magnétiques. Les traits noirs correspondent aux *line drawings* des profils Dakhla et pétroliers. Le toit du socle est marqué par un trait épais marron, la base de la croûte et les réflecteurs intracrustaux par des traits épais noirs.



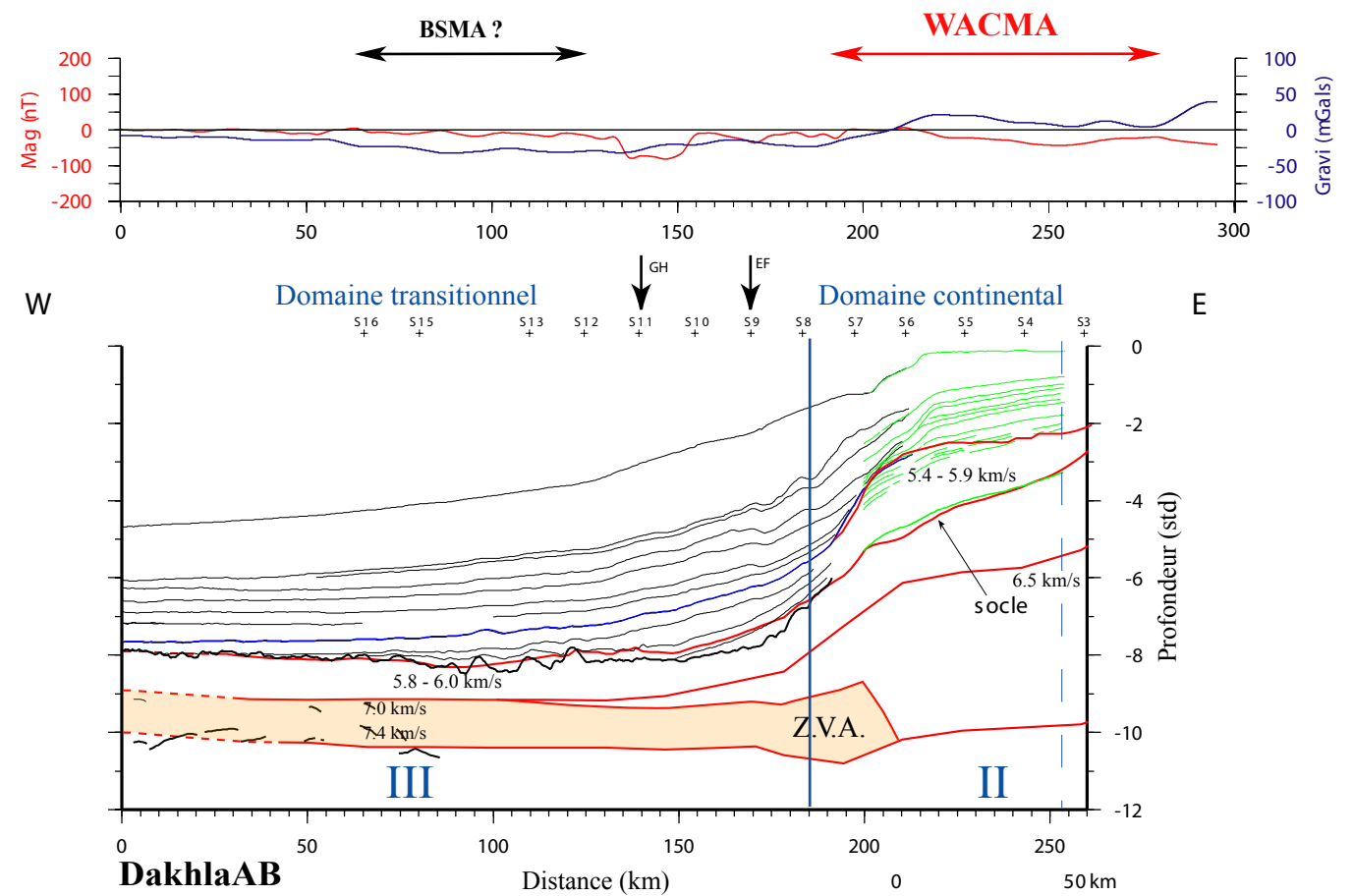


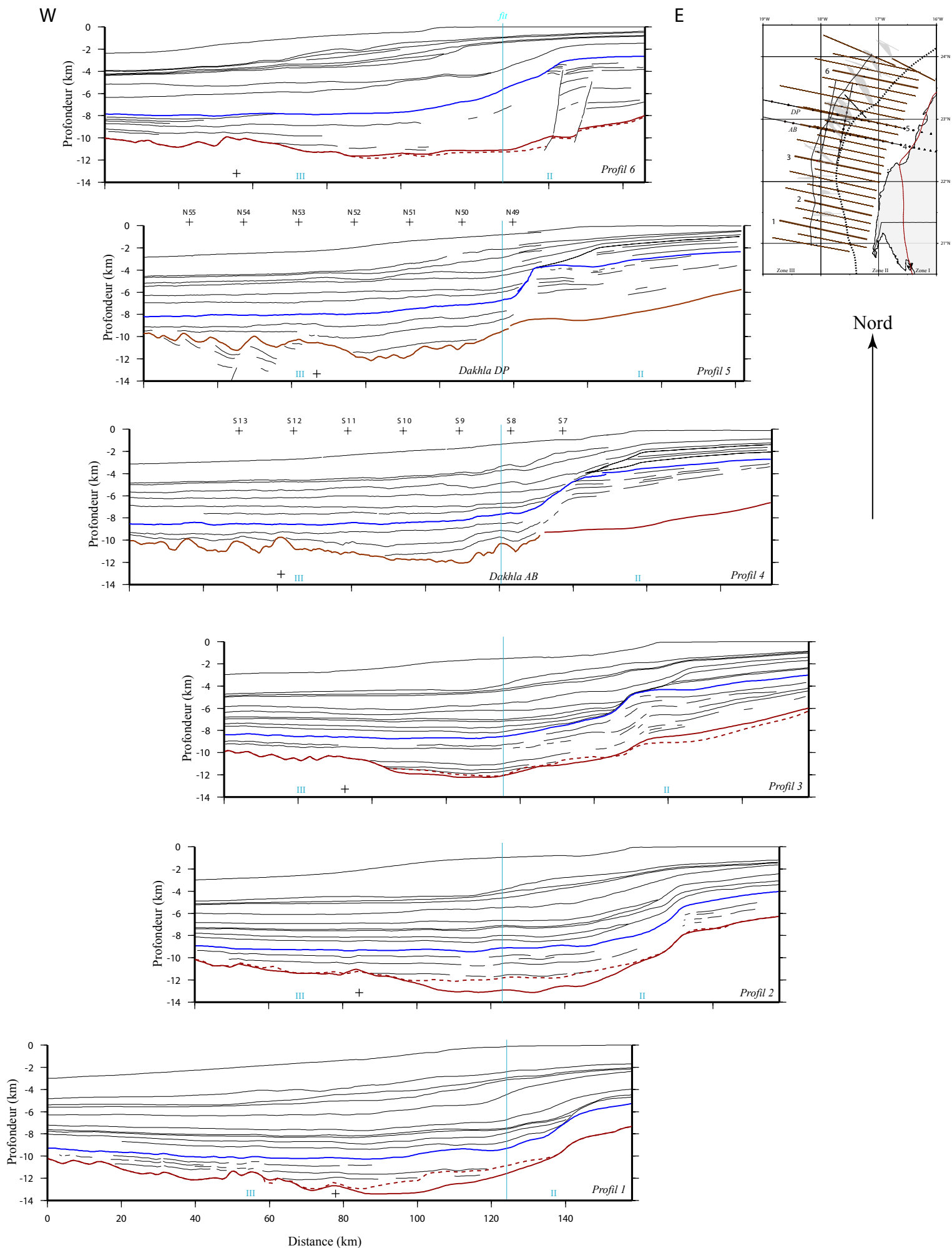


**Figure III-12 :** Modèles de vitesse des deux profils perpendiculaires à la marge Dakhla depuis le Nord (en haut) vers le Sud (en bas). Les trois grands domaines de la marge et les quatre zones (I, II, III, IV) ont été représentés. Les données de sismique réfraction ont été traitées par F. Klingelhoetter. Les vitesses sont indiquées en km/s, et les couleurs vives sont les aires réellement échantillonnées par les rais sismiques.

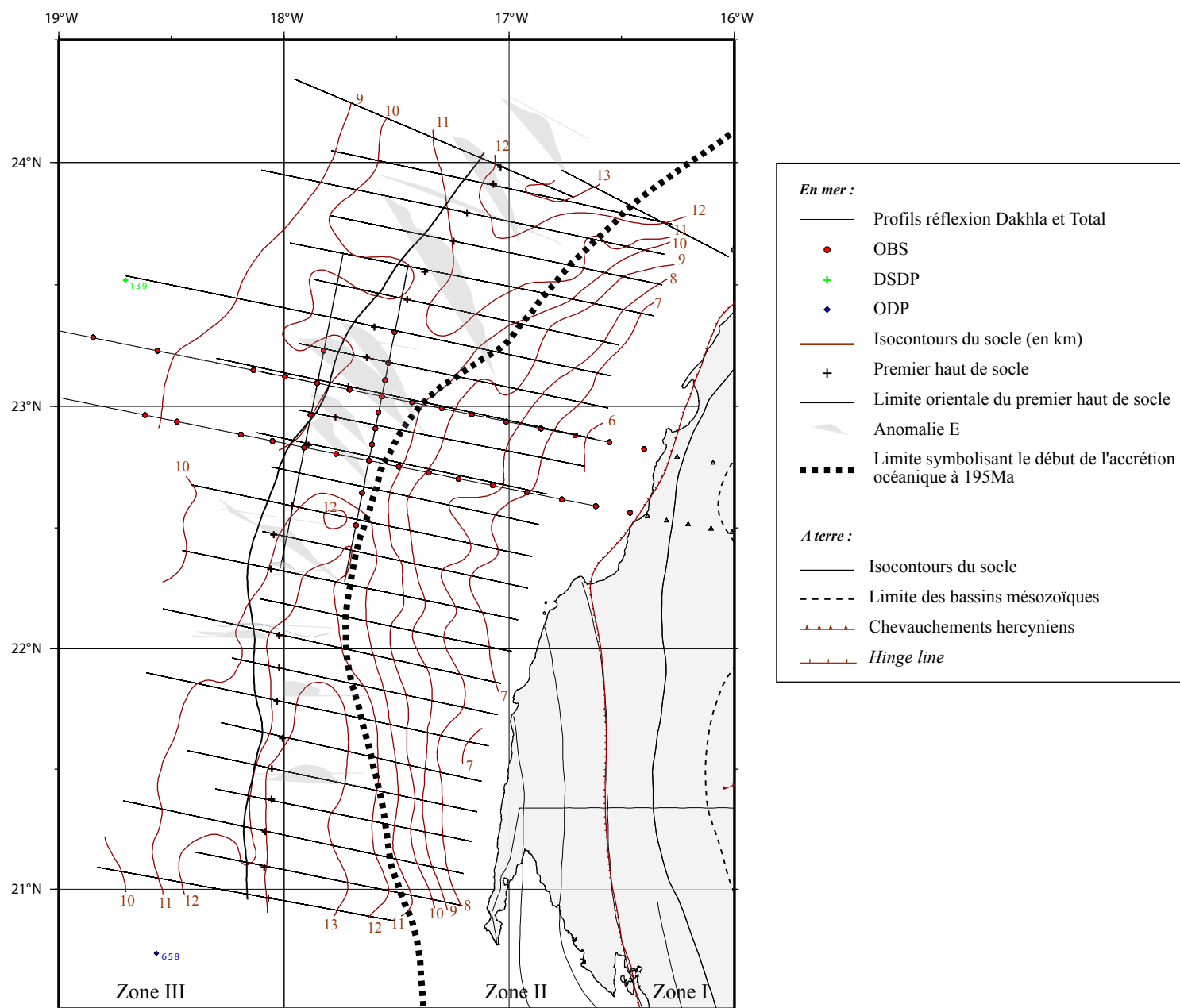


**Figure III-13** : Les *line drawings* des deux profils de sismique réflexion perpendiculaires à la marge Dakhla, implantés du Nord (en haut) au Sud (en bas). Les traits noirs correspondent aux *line drawings* des profils Dakhla, les traits verts correspondent aux *line drawings* des profils pétroliers et les rouges aux limites du modèle de vitesse issues de la réfraction (pour le toit du socle, la Z.V.A. et le Moho). Les traits pointillés rouges représentent les zones non échantillonnées par les rais sismiques. Les trois grands domaines de la marge ont été représentés (traits bleus). La limite supérieure de la Z.V.A. prise à 7.0 km/s est arbitraire.



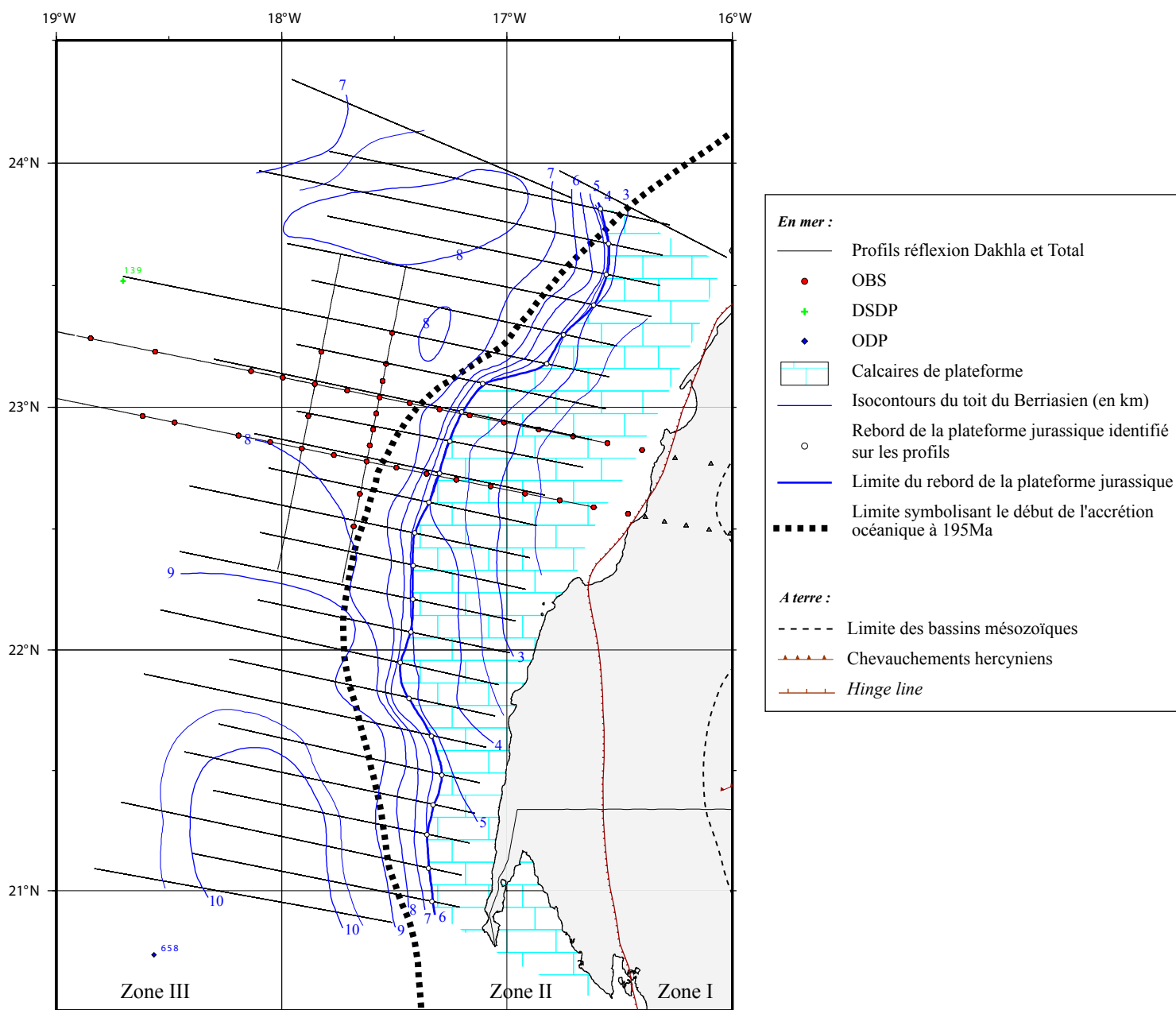


**Figure III-14** : Line drawings de profils de sismique réflexion perpendiculaires à la marge Dakhla. Le trait marron correspond à notre interprétation du toit de la croûte, le trait en pointillé marron représente le toit de la croûte identifié par Total. Le trait bleu correspond au toit du Berriasien (142 Ma ; Gradstein *et al.*, 2004).

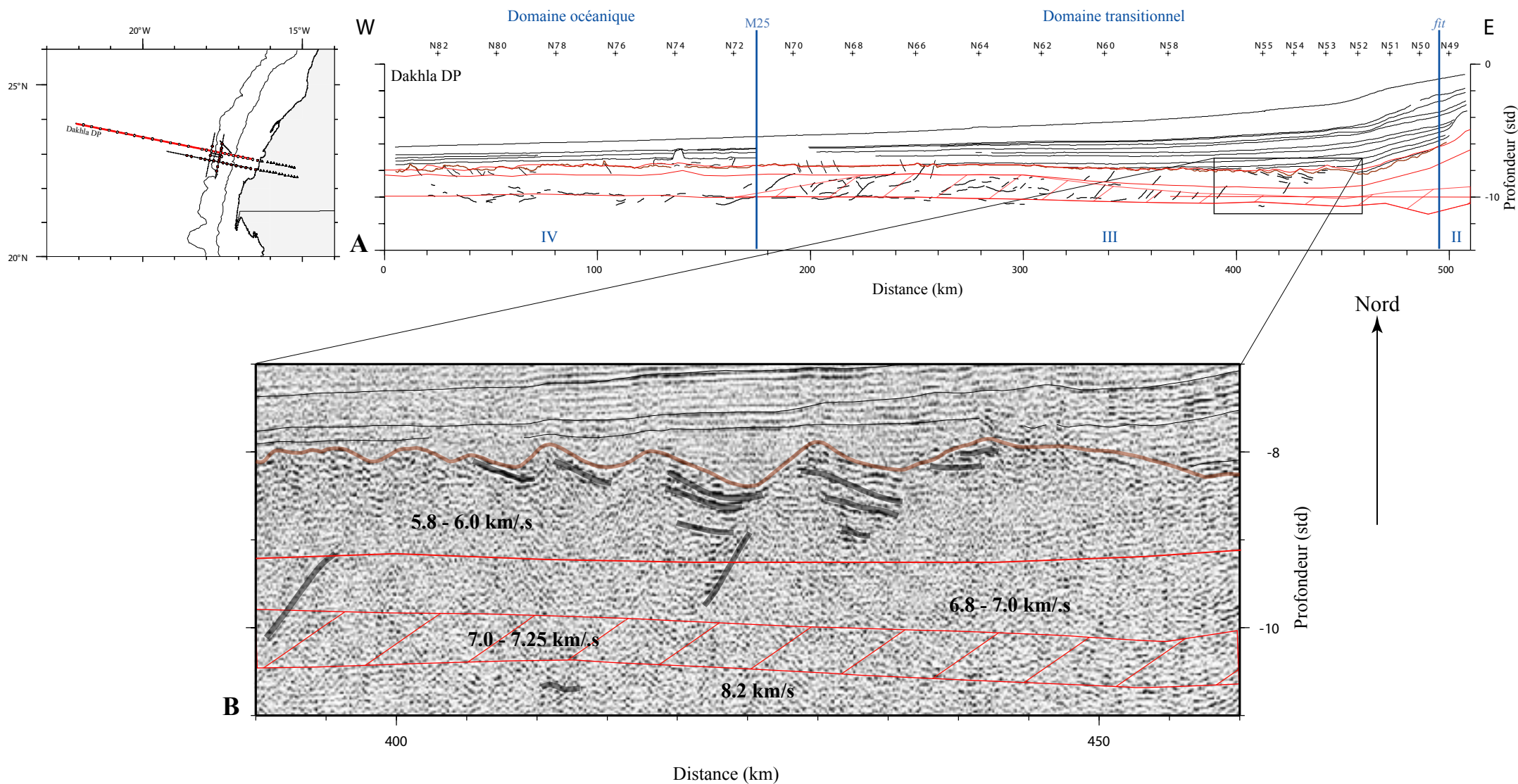


**Figure III-15 :** Carte du toit du socle, réalisée à partir des profils de sismique réflexion Dakhla et Total (profondeur en km). Cette figure montre que la zone d'étude Dakhla se situe sur un haut de socle. Au Nord et au Sud, il existe deux bassins profonds (13 km environ). Les chiffres en marron indiquent les profondeurs du socle en km.

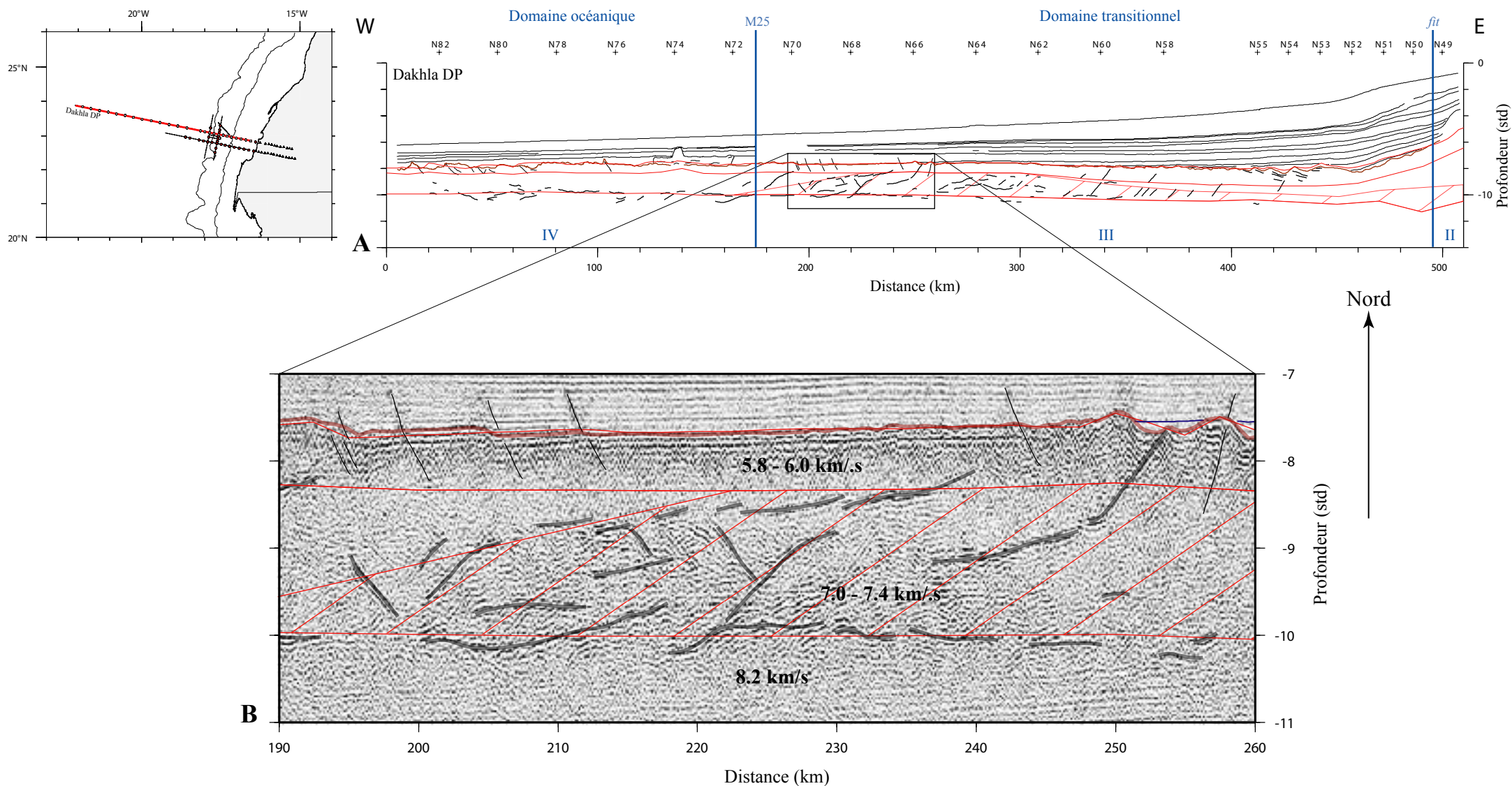




**Figure III-16 :** Carte des isocontours du toit du Berriasien, réalisée à partir des profils de sismique réflexion Dakhla et Total (profondeur en km). Les chiffres en bleu indiquent les profondeurs du toit du Berriasien en km.



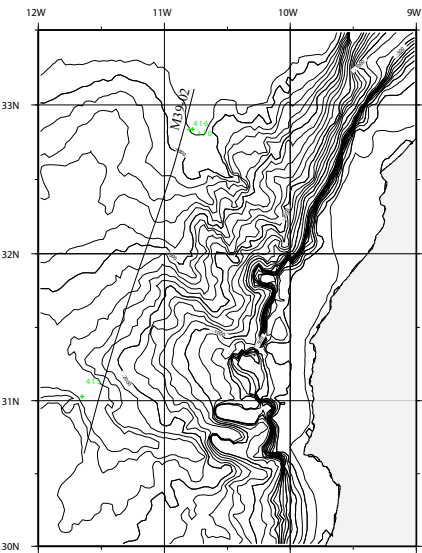
**Figure III-17** : En A, le *line drawing* du profil Dakhla DP surimposé au modèle de vitesse (traits rouges) issu des données de réfraction. Les domaines (traits bleus) et les zones ont été représentés. Le cadre noir correspond au zoom montré à la figure B. La figure B montre qu'au niveau du bas de pente continentale, le socle est pourvu de quatre hauts de socle avec des réflecteurs bien marqués, pentés vers le continent et situés juste au-dessous de ces hauts de socle. Ils se trouvent dans une croûte de vitesse 5.8 - 6.0 km/s.



**Figure III-18** : En A, le *line drawing* du profil Dakhla DP surimposé au modèle de vitesse (traits rouges) issu des données de réfraction. Les domaines (traits bleus) et les zones ont été représentés. Le cadre noir correspond au zoom montré à la figure B. La figure B montre que les réflecteurs de forte amplitude, discontinus coïncident avec la présence de la Z.V.A. (vitesses comprises entre 7.0 - 7.4 km/s). Notons par ailleurs que l'aspect lisse du socle semble également coïncider avec la Z.V.A. lorsque cette dernière atteint une épaisseur de 2 std.

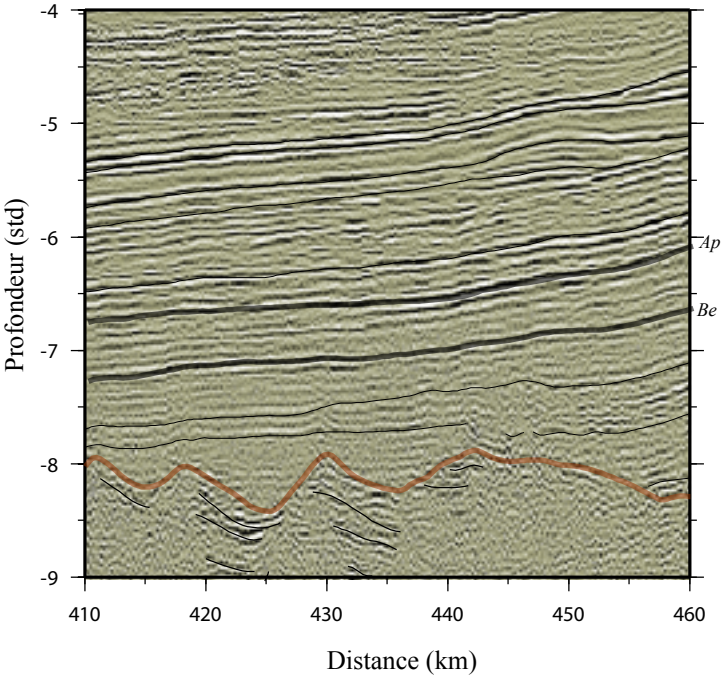


A. Colonne lithostratigraphique du site de forage DSDP 416 (Leg 50)



Echelle des temps géologiques				Lithologie
Néogène	Pliocène	Plaisancien		nannofossil marl and nannofossil ooze
		Zancleén		
	Miocène	Messinien		turbidites : sandstone, diatom-rich nannofossil marl, and chalk
		Tortonien		
		Serravalien		
		Langhien		
		Burdigalien		
		Aquitanien		
	Oligocène	Chattien		turbidites : mudstone, siltstone, sandstone, gravel, and rare porcellanite
		Rupélien		
Paléogène	Éocène	Priabonien		turbidites : mudstone, siltstone, sandstone, gravel, and rare porcellanite
		Bartonien		
		Lutétien		
		Yprésien		
	Paléocène	Thanétien		nannofossil marlstone
		Sélandien		
		Danien		
Crétacé	Inférieur	Albien		claystone, silty claystone, sandstone and siltstone
		Aptien		
		Barrémien		turbidites : sandstone, siltstone and mudstone, calcareous and quartzose
		Hauterivien		
		Valanginien		
		Berriasien		turbidites : siltstone and mudstone with hard micrite and calcarenite
	Sup.	Tithonien		

B. Profil Dakhla DP



C. Profil Meteor M39-02

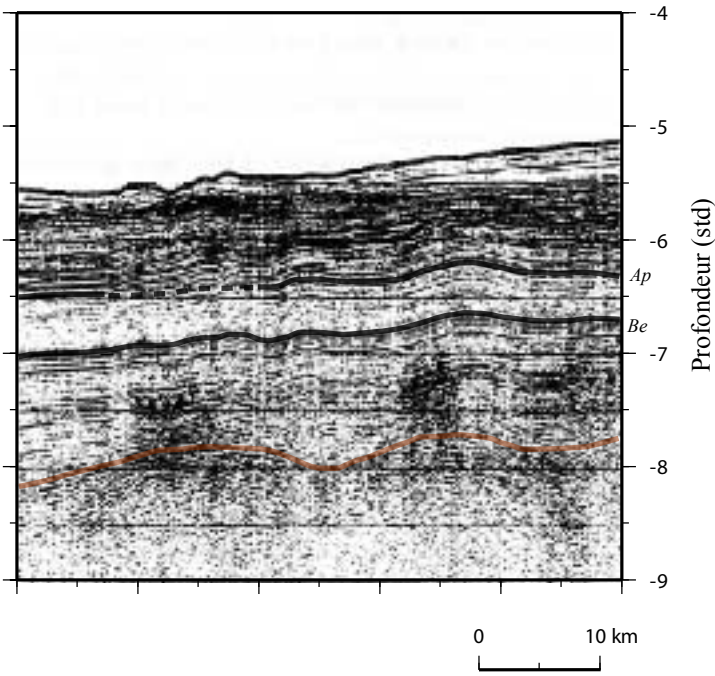
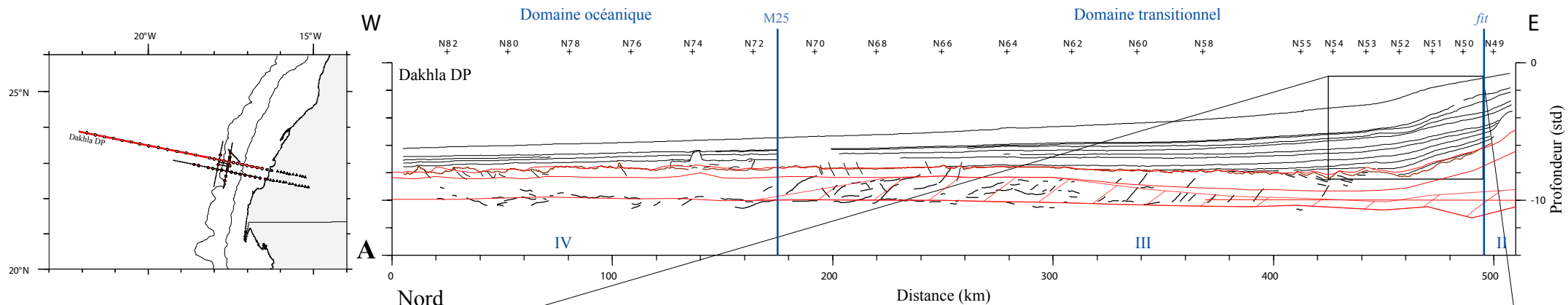
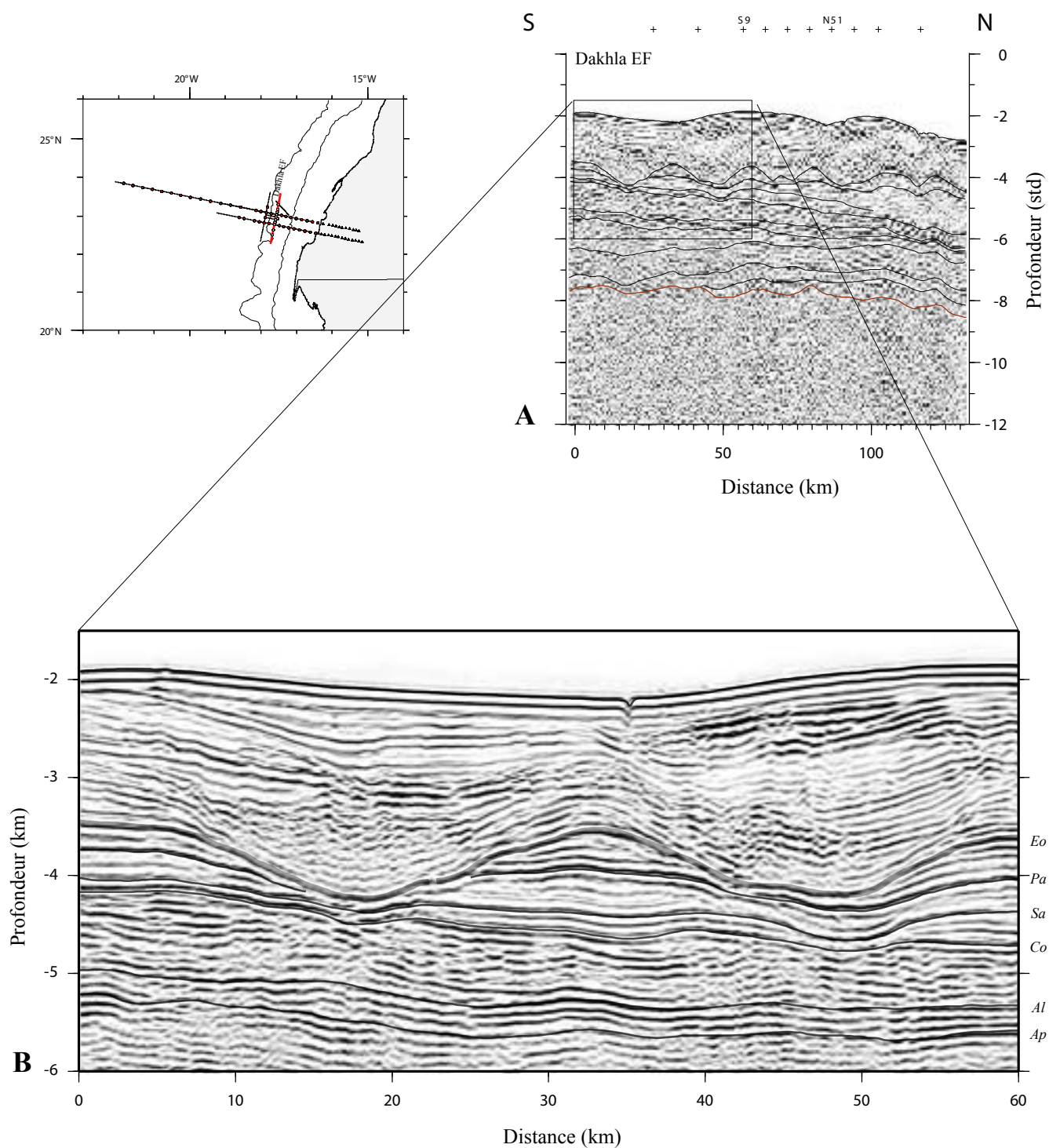


Figure III-19 : Corrélation entre les données de forage (marqueurs sismiques datés) et une portion de profil Dakhla DP. Deux horizons ont été identifiés : Be (Berriasien) et Ap (Aptien). Pour faire cette comparaison, j'ai choisi de prendre une zone du profil Dakhla DP où la croûte est du même âge que celui du profil Meteor M39-02, autour de l'anomalie E.

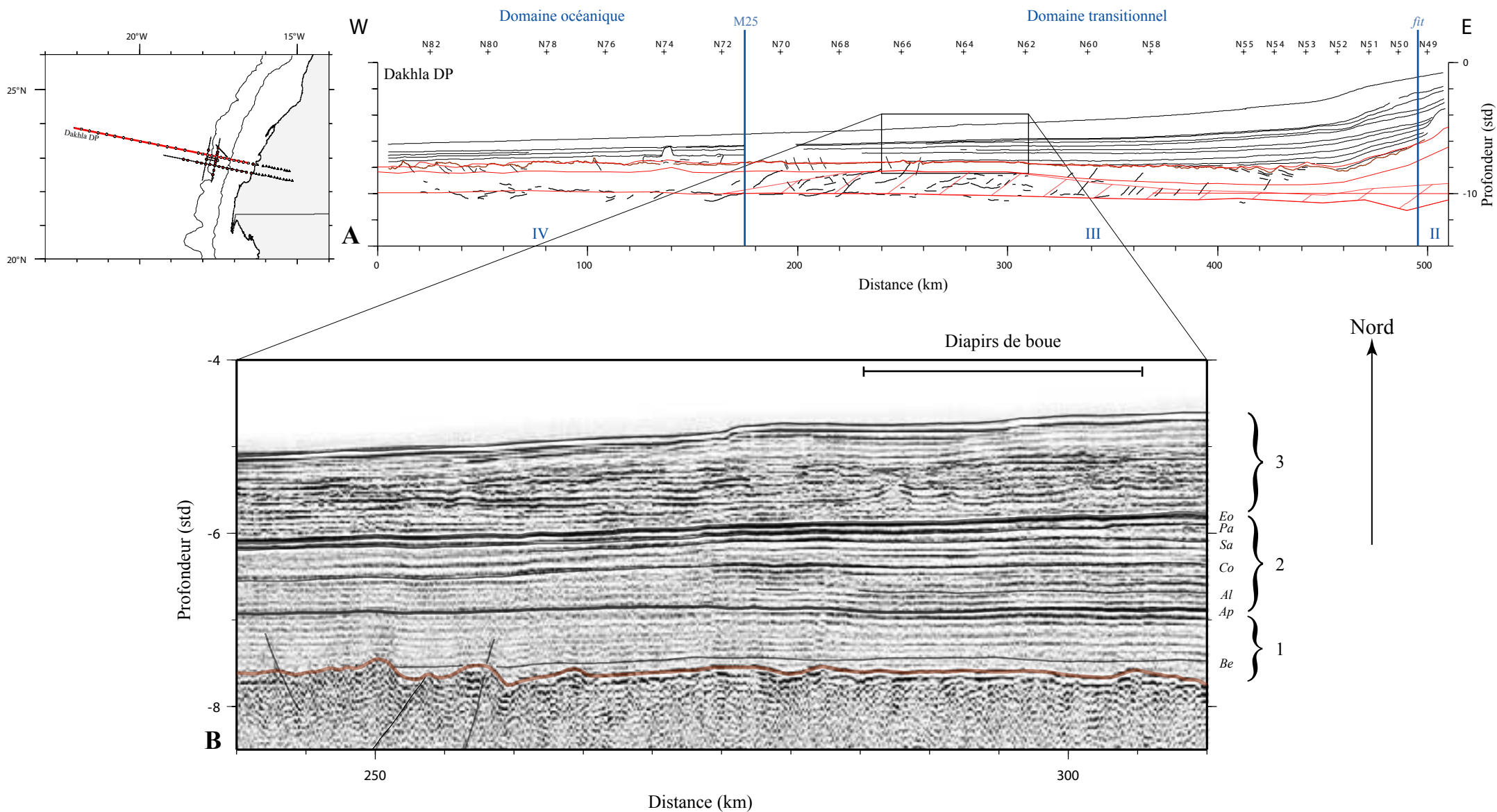




**Figure III-20 :** En A, le *line drawing* du profil Dakhla DP surimposé au modèle de vitesse (traits rouges) issu des données de réfraction. Les domaines (traits bleus) et les zones ont été représentés. Le cadre noir correspond au zoom montré à la figure B. La figure B image la couverture sédimentaire située au bas de la pente continentale. La faciès 1 correspond à une série litée du Jurassique-Aptien supérieur. Elle repose en *onlap* sur le toit de la croûte océanique (flèches bleues). Le faciès 2 est un faciès composite de l'Aptien supérieur-Eocène. Le faciès 3, faciès chaotique, représente les dépôts sédimentaires de l'Eocène jusqu'à l'Actuel. Les réflecteurs sont : Eo=base Eocène, Pa=base Paléocène, Sa=toit Santonien, Co=base Coniacien, Al=toit Albien, Ap=toit Aptien, Be=toit Berriasien.

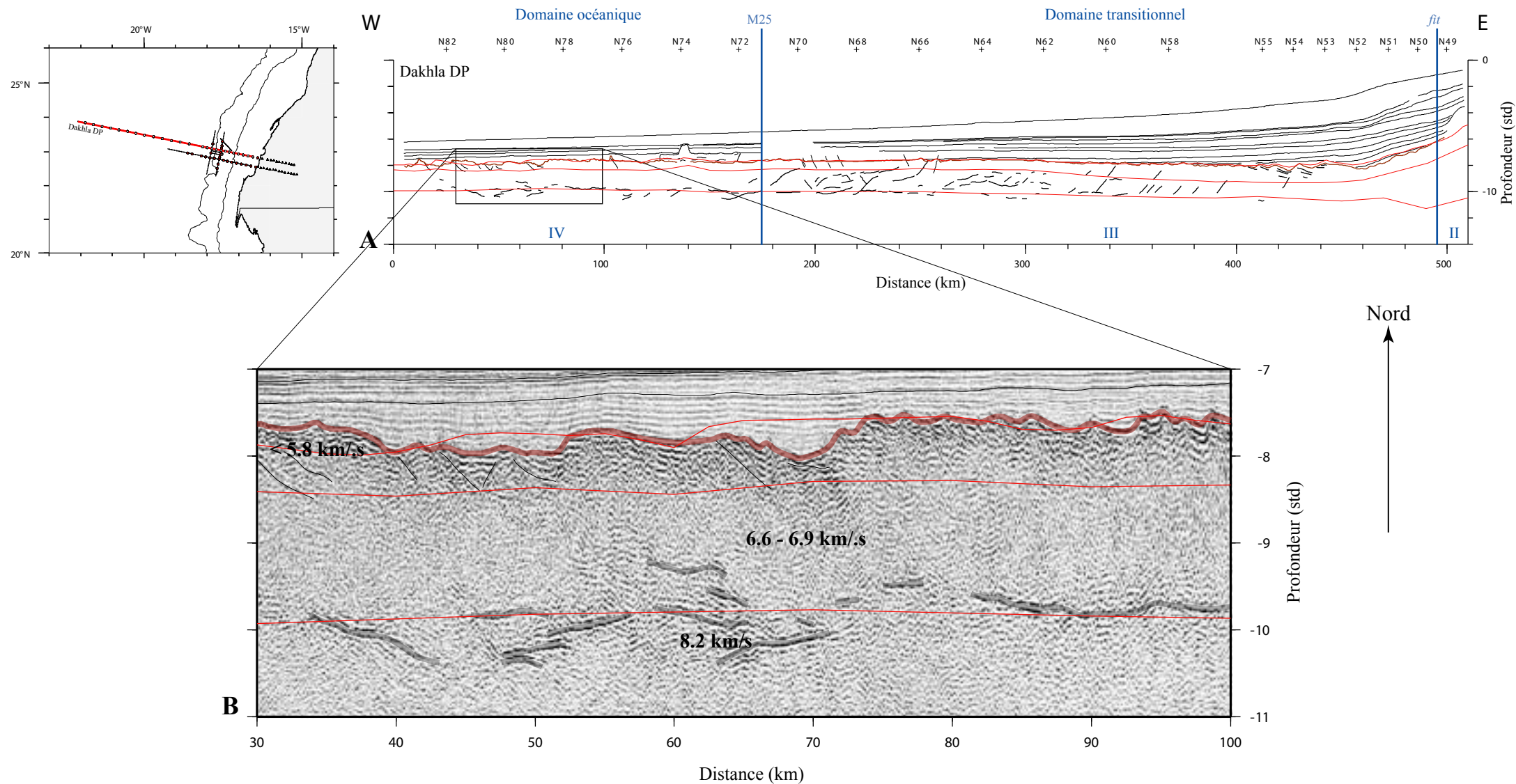


**Figure III-21** : En A, le profil Dakhla EF, parallèle à la marge, situé au niveau de la pente continentale. Le cadre noir correspond au zoom montré à la figure B. La figure B image la couverture sédimentaire et illustre l'importance des cycles érosifs à partir du Crétacé supérieur. Les réflecteurs, datés par Total, sont : Eo=base Eocène, Pa=base Paléocène, Sa=toit Santonien, Co=base Coniacien, Al=toit Albien, Ap=toit Aptien.



**Figure III-22 :** En A, le *line drawing* du profil Dakhla DP surimposé au modèle de vitesse (traits rouges) issu des données de réfraction. Les domaines (traits bleus) et les zones ont été représentés. Le cadre noir correspond au zoom montré à la figure B. La figure B donne une image de la couverture sédimentaire dans la plaine abyssale. Les unités 1 et 2 présentent un faciès lité, et l'unité 3 un faciès plutôt chaotique.

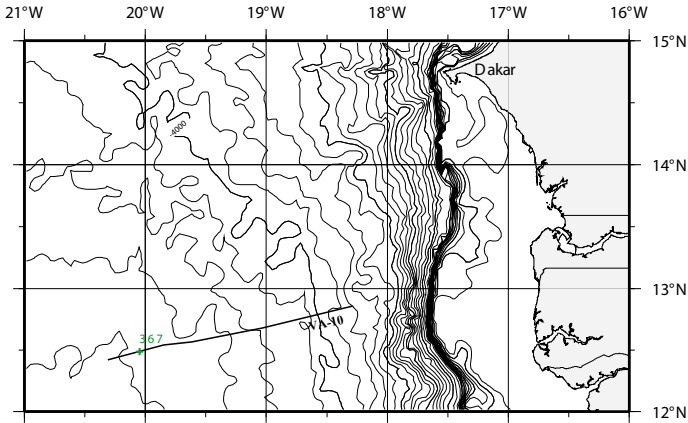




**Figure III-23** : En A, le *line drawing* du profil Dakhla DP surimposé au modèle de vitesse (traits rouges) issu des données de réfraction. Les domaines (traits bleus) et les zones ont été représentés. Le cadre noir correspond au zoom montré à la figure B. La figure B montre que le socle est rugueux. Les données de réfraction montrent que les réflecteurs horizontaux de forte amplitude coïncident avec le Moho.

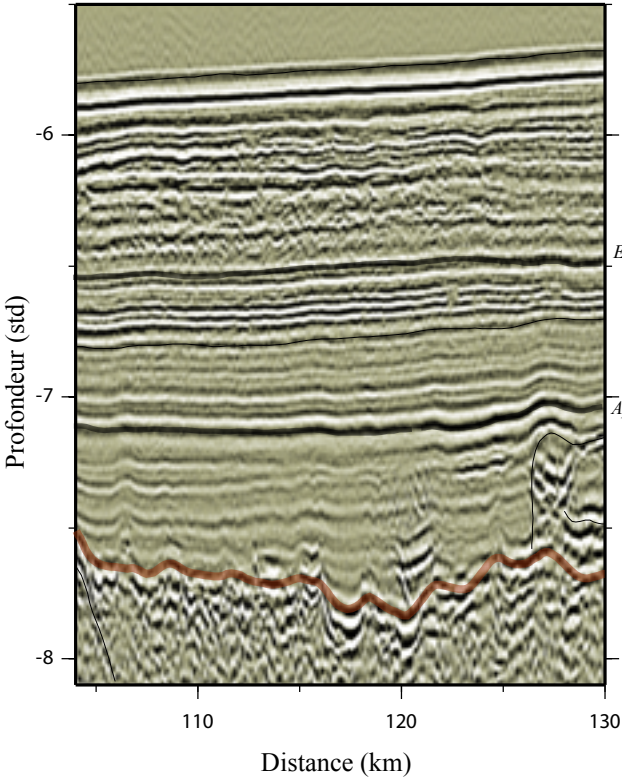


A. Colonne lithostratigraphique du site de forage DSDP 367 (Leg 41)



Echelle des temps géologiques		Lithologie	
Néogène	Quaternaire		
	Plaisancien		marls, clay and sand layers
	Zancéen		
	Messinien		
	Tortonien		
	Serravalien		
	Langhien		hiatus
	Burdigalien		
	Aquitanien		
	Chartien		
	Rupélien		
Paléogène	Oligocène		zeolitic clay with chert and porcellanite
	Priabonien		
	Bartonian		
	Luétien		
	Yprésien		
	Thaméen		variegated silty clay
	Selandien		
	Danien		
	Maastrichtien		
	Campanien		
Crétacé	Supérieur		black shale
	Santonien		
	Coniacien		
	Turonien		
	Cénomanién		
	Albien		variegated claystone
	Aptien		
	Barrémien		
	Hauterivién		
	Valanginién		
	Inférieur		light gray nannofossil limestone, olive marlstone, and black shale
	Berriasien		
	Tithonien		
	Kimmeridgien		
	Supérieur		reddish brown nannofossil bearing argillaceous limestone, marl, claystone and chert
	Oxfordien		
			basalt

B. Profil Dakhla DP



C. Profil Valvidia VA10

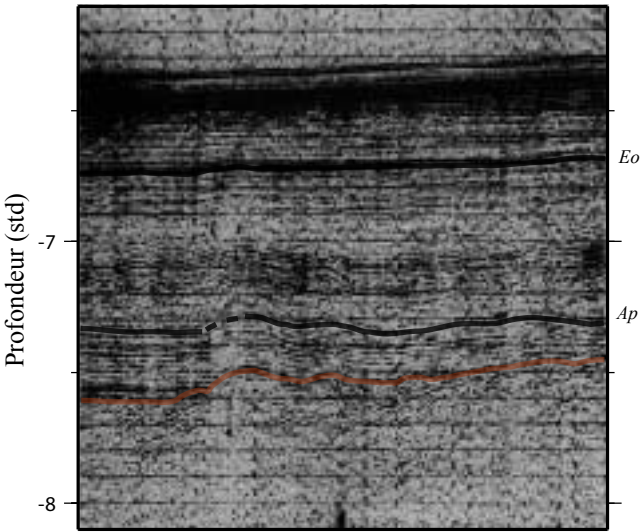
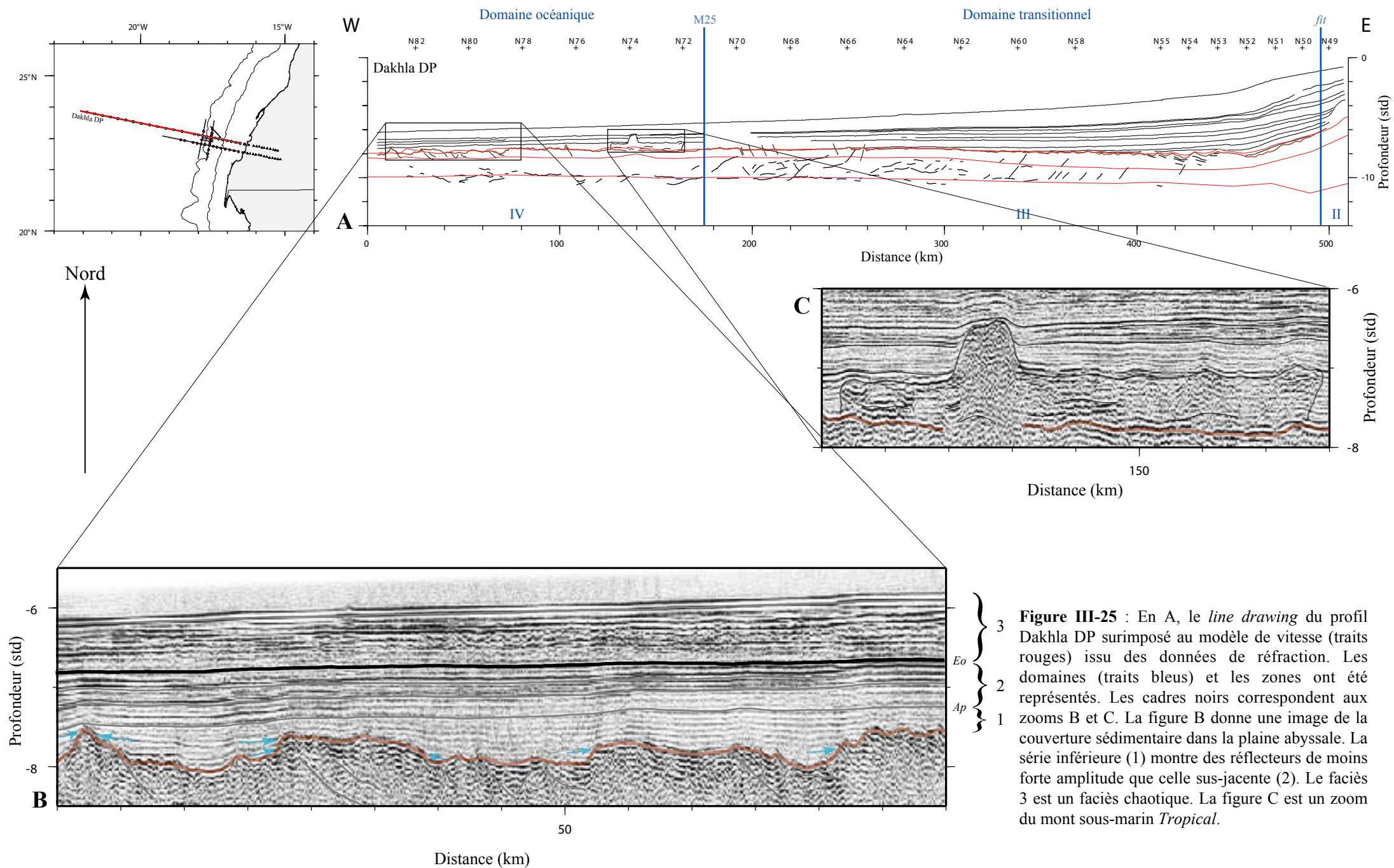
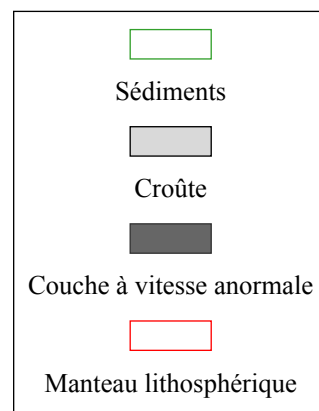
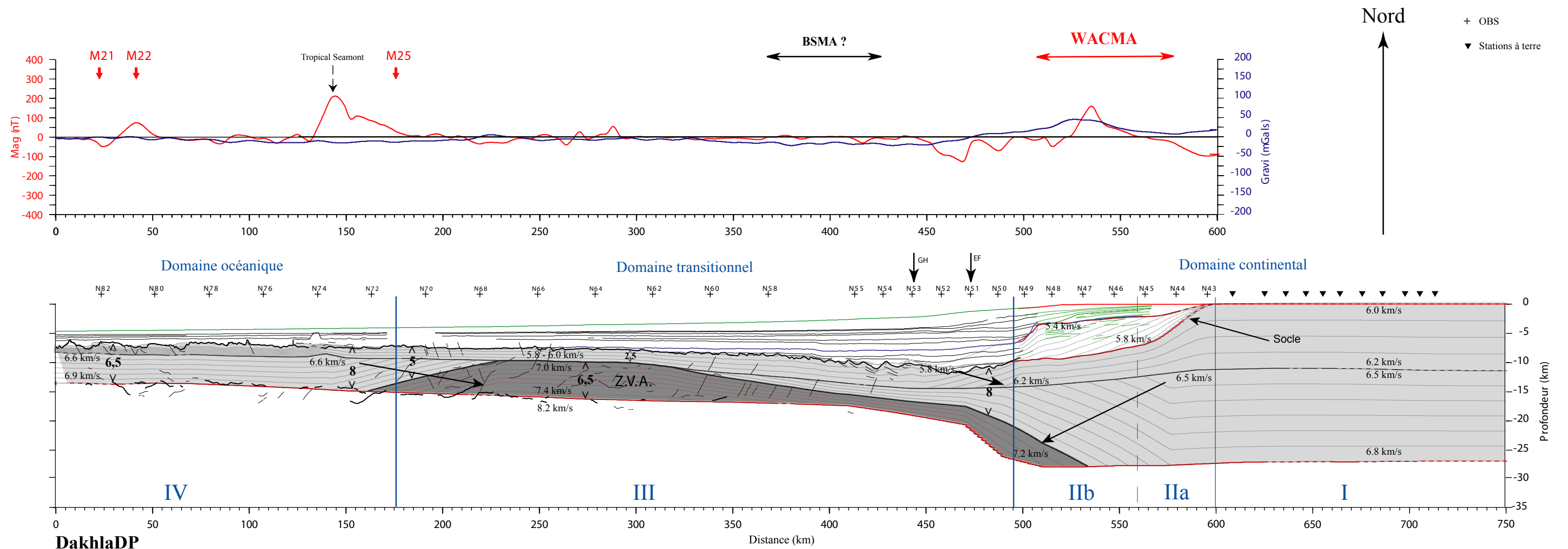
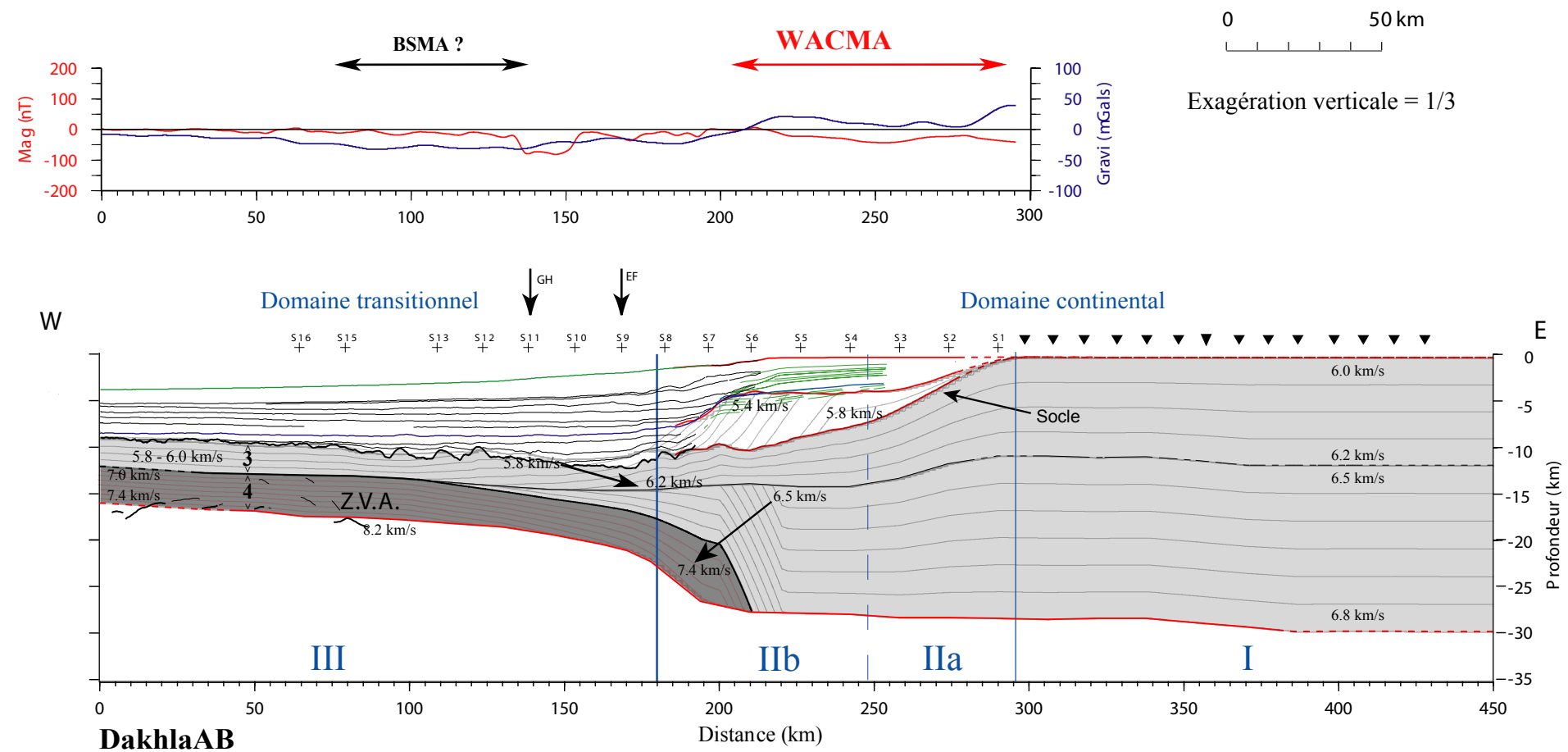


Figure III-24 : Corrélation entre les données de forage (marqueurs sismiques datés) et une portion de profil Dakhla DP. Deux horizons ont été identifiés : Ap (Aptien) et Eo (Eocene).

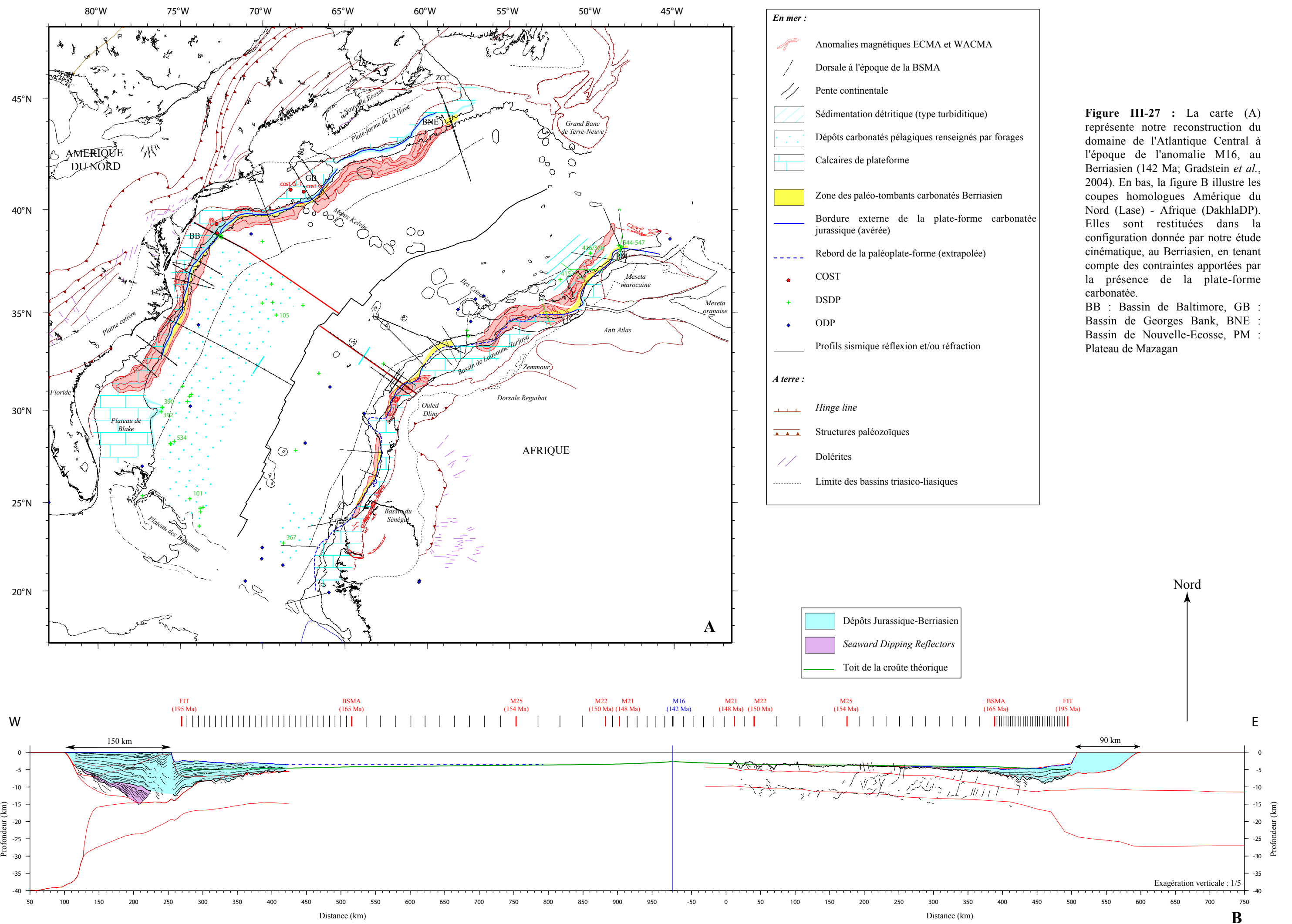




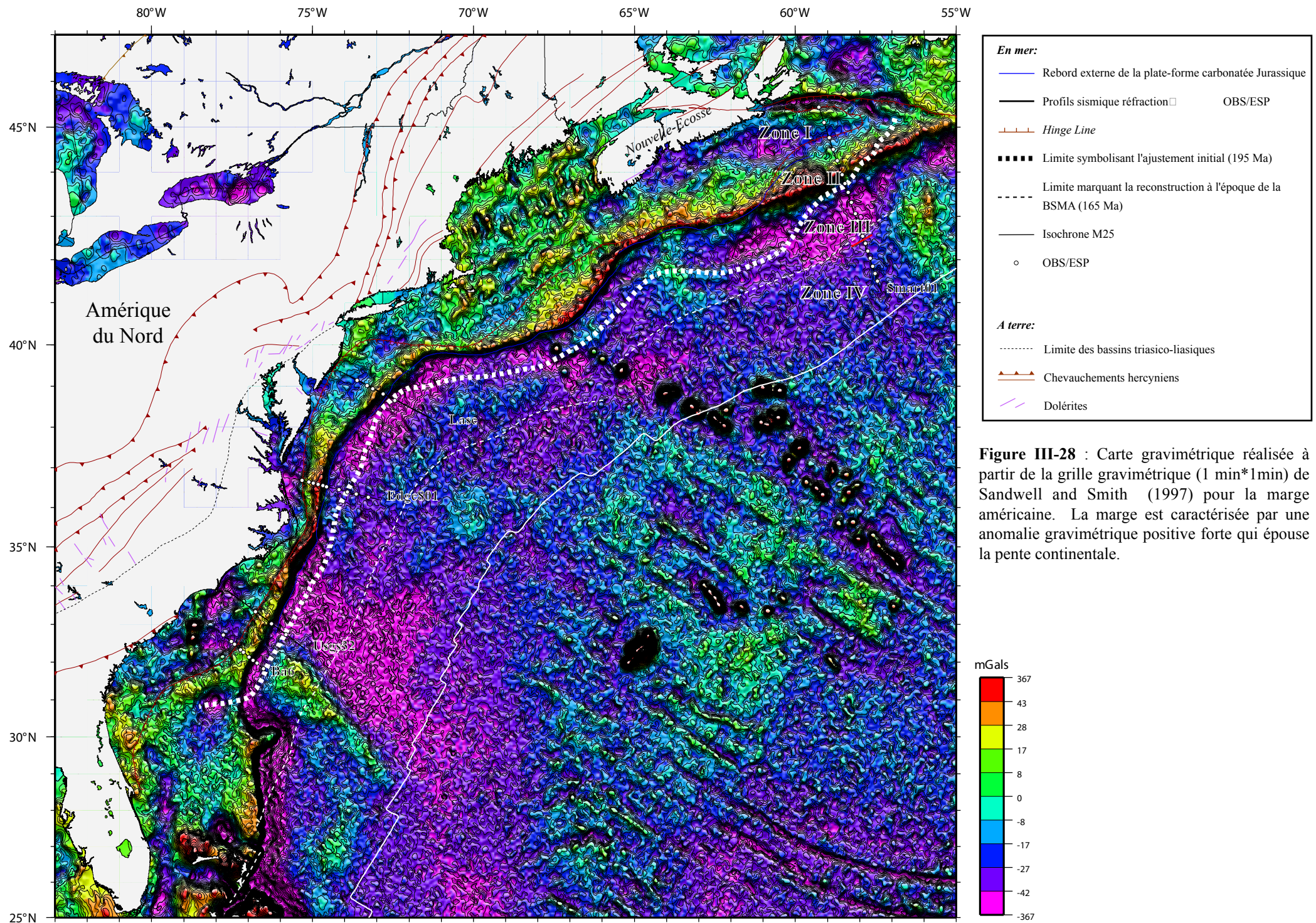
**Figure III-26** : Synthèse des deux coupes perpendiculaires à la marge Dakhla à partir des données de sismique réflexion et de sismique réfraction. Les traits en noir indiquent que l'information provient de la sismique réflexion, les traits en rouge de la sismique réfraction. Les trois grands domaines et les quatre zones ont été représentés. La géométrie des réflecteurs de la couverture sédimentaire a été restituée (conversion en profondeur avec le logiciel Zelt (Zelt and Smith, 1992)). Les traits fins dans la croûte (continentale et océanique) et la plateforme carbonatée sont des courbes d'isovitesse, espacées de 0.5 km/s et issues du modèle de réfraction.







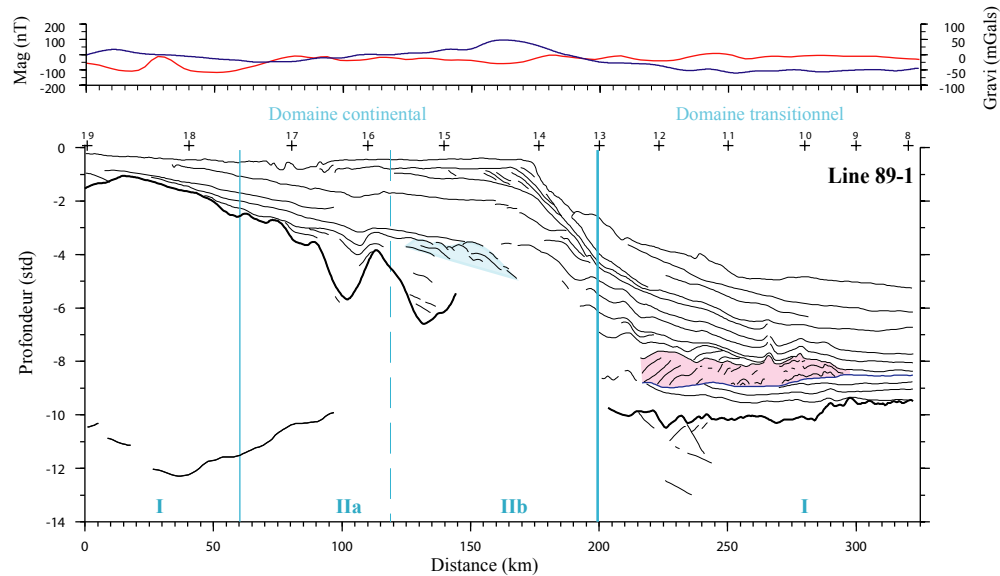




**Figure III-28 :** Carte gravimétrique réalisée à partir de la grille gravimétrique (1 min\*1min) de Sandwell and Smith (1997) pour la marge américaine. La marge est caractérisée par une anomalie gravimétrique positive forte qui épous la pente continentale.

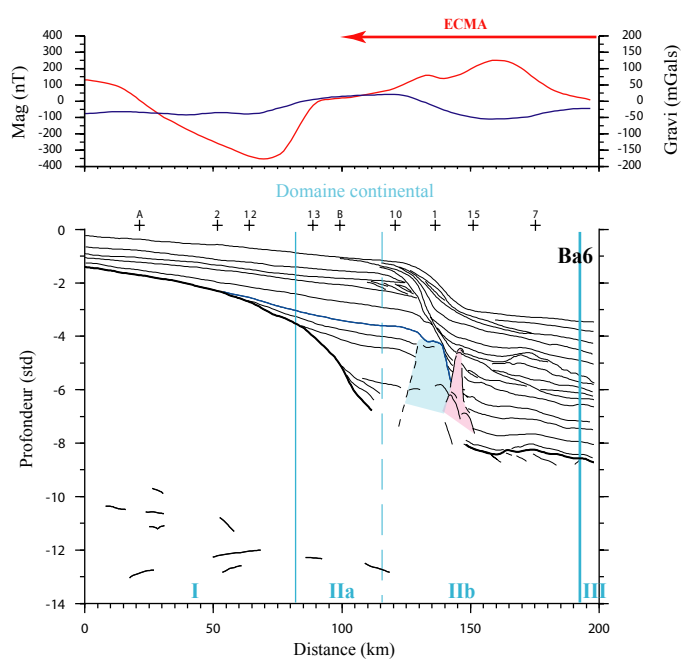
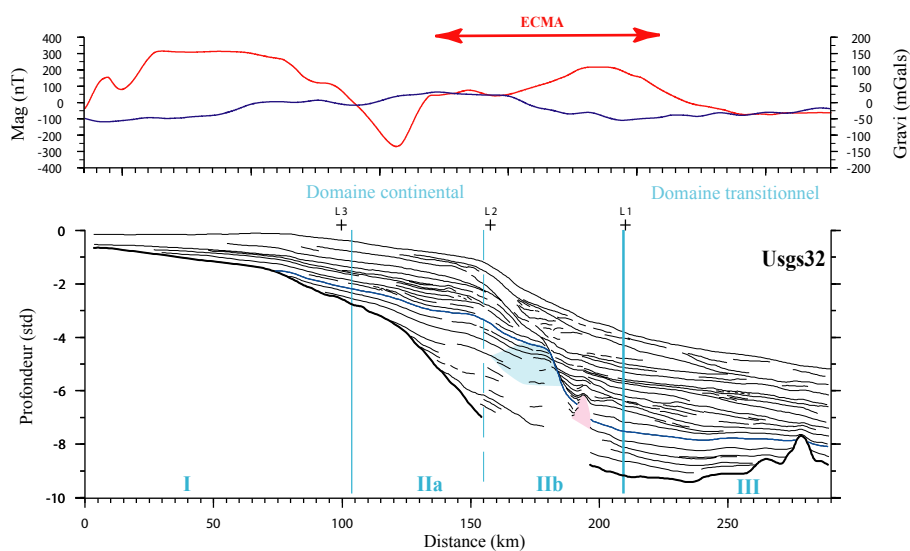
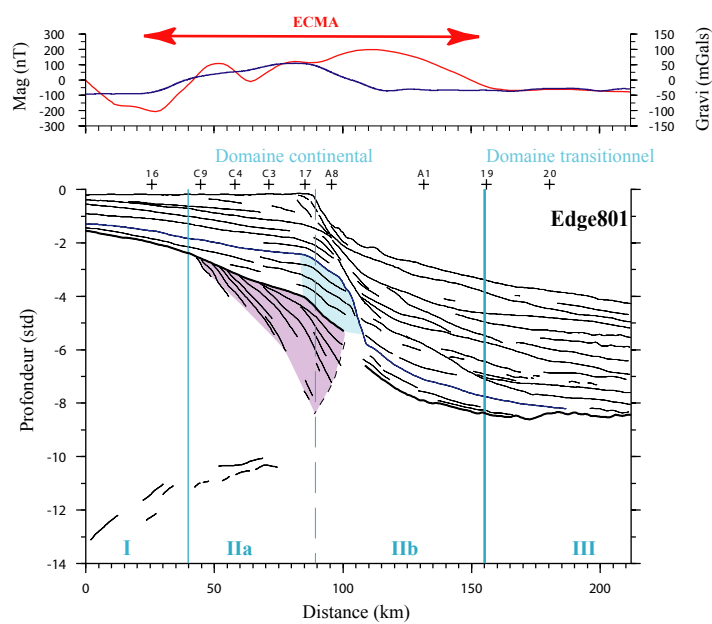
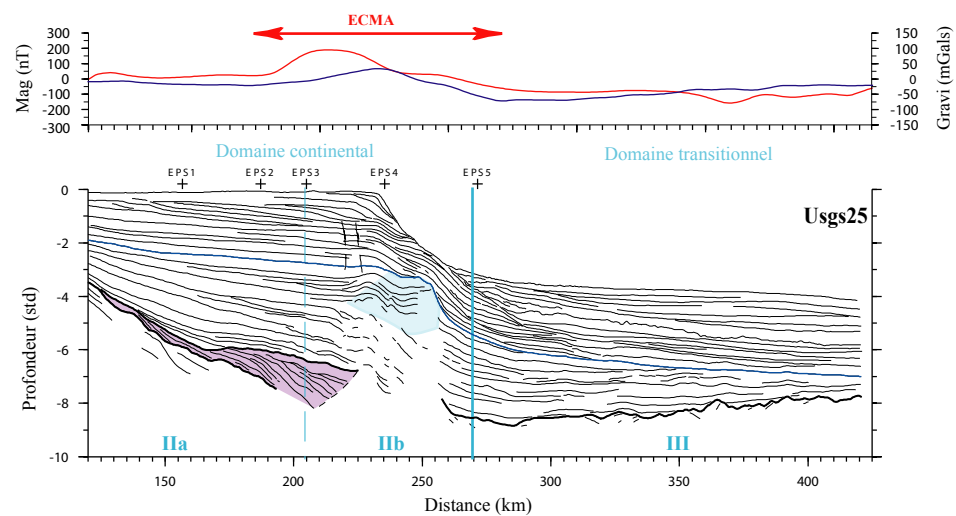


W



E

Nord

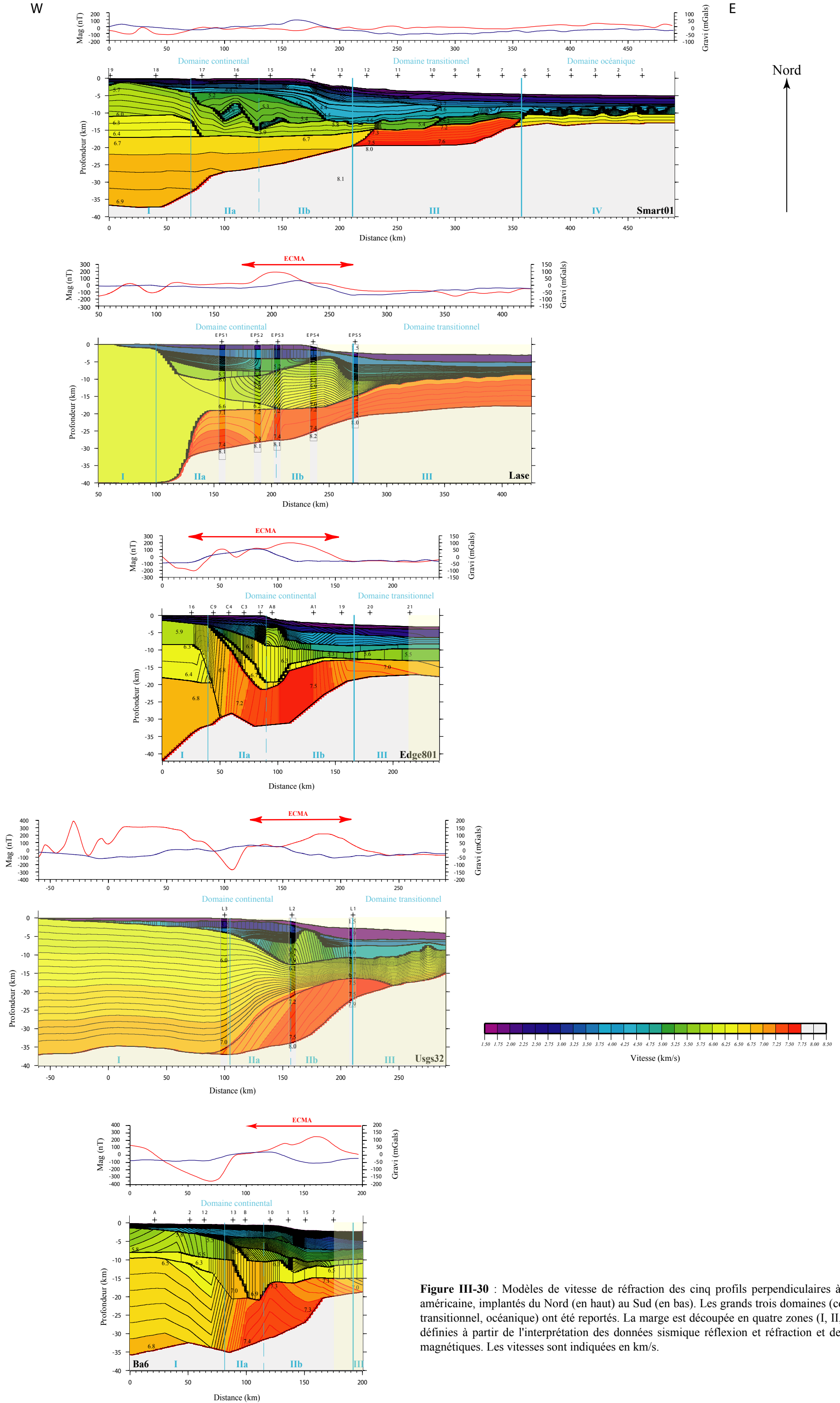


**Figure III-29** : Les cinq profils de sismique réflexion perpendiculaires à la marge américaine, implantés du Nord (en haut) au Sud (en bas). Ils montrent les trois domaines (continental, transitionnel, océanique). La marge est découpée en quatre zones (I, II, III et IV) définies à partir de l'interprétation des données sismique réflexion et réfraction et des données magnétiques. Le toit du socle, la base de la croûte sont marqués par un trait épais noir, le toit du Berriasien par un traits épais bleu. Les *Seaward Dipping Reflectors* sont caractérisés par la couleur mauve, le sel par le rose et le rebord de la plate-forme par le bleu.

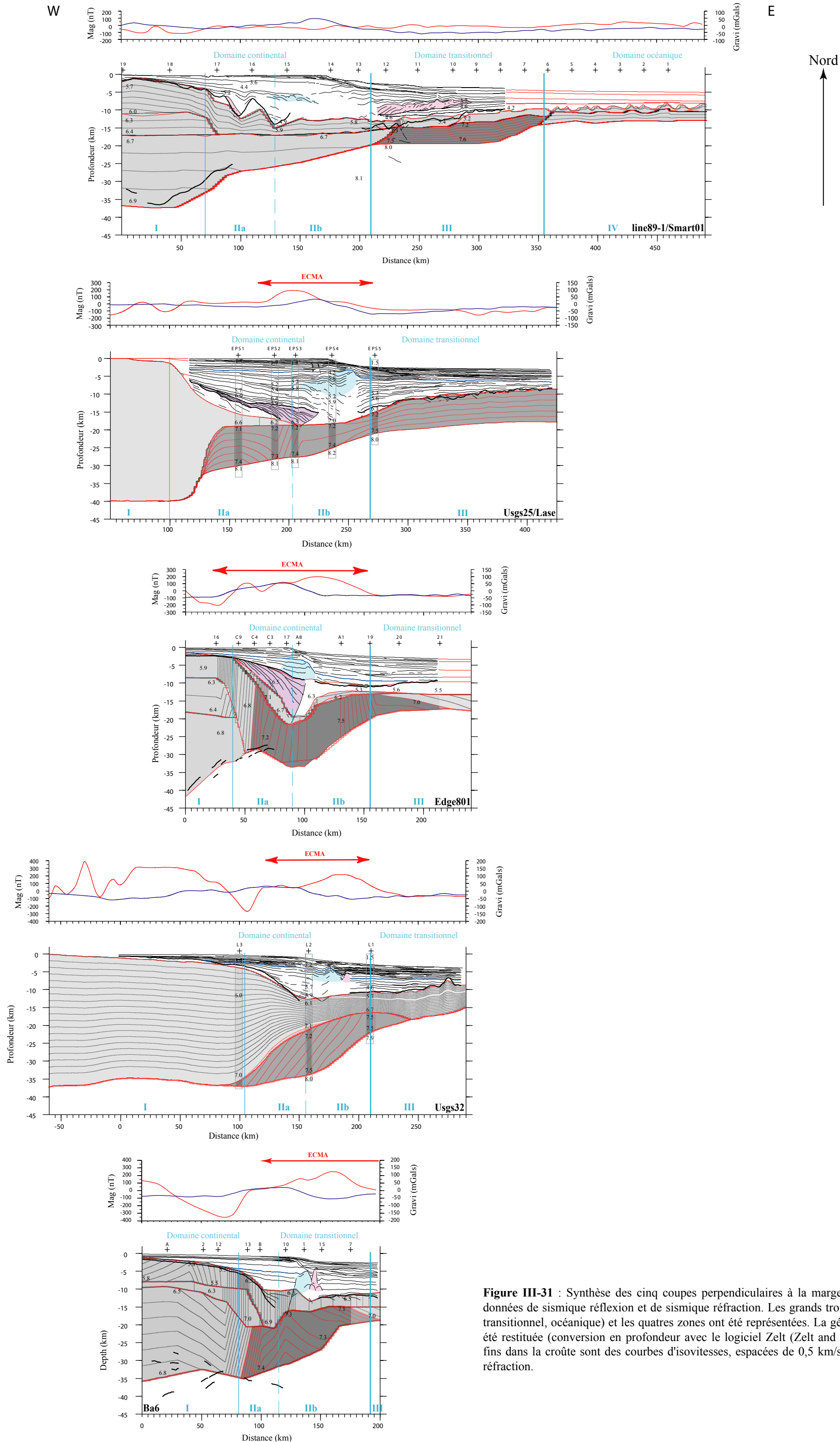
W

E

Nord



**Figure III-30 :** Modèles de vitesse de réfraction des cinq profils perpendiculaires à la marge américaine, implantés du Nord (en haut) au Sud (en bas). Les grands trois domaines (continental, transitionnel, océanique) ont été reportés. La marge est découpée en quatre zones (I, II, III et IV) définies à partir de l'interprétation des données sismique réflexion et réfraction et des données magnétiques. Les vitesses sont indiquées en km/s.

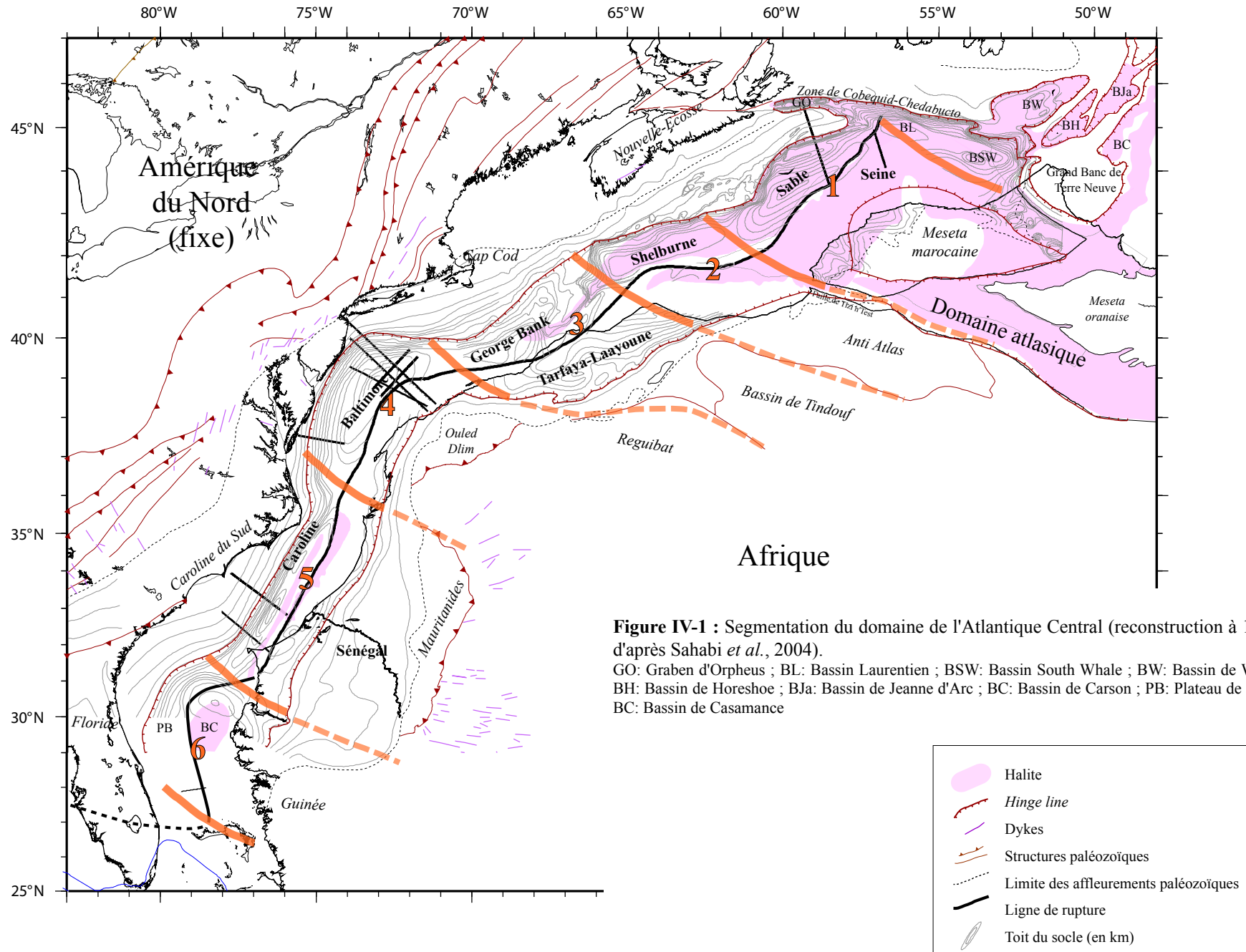


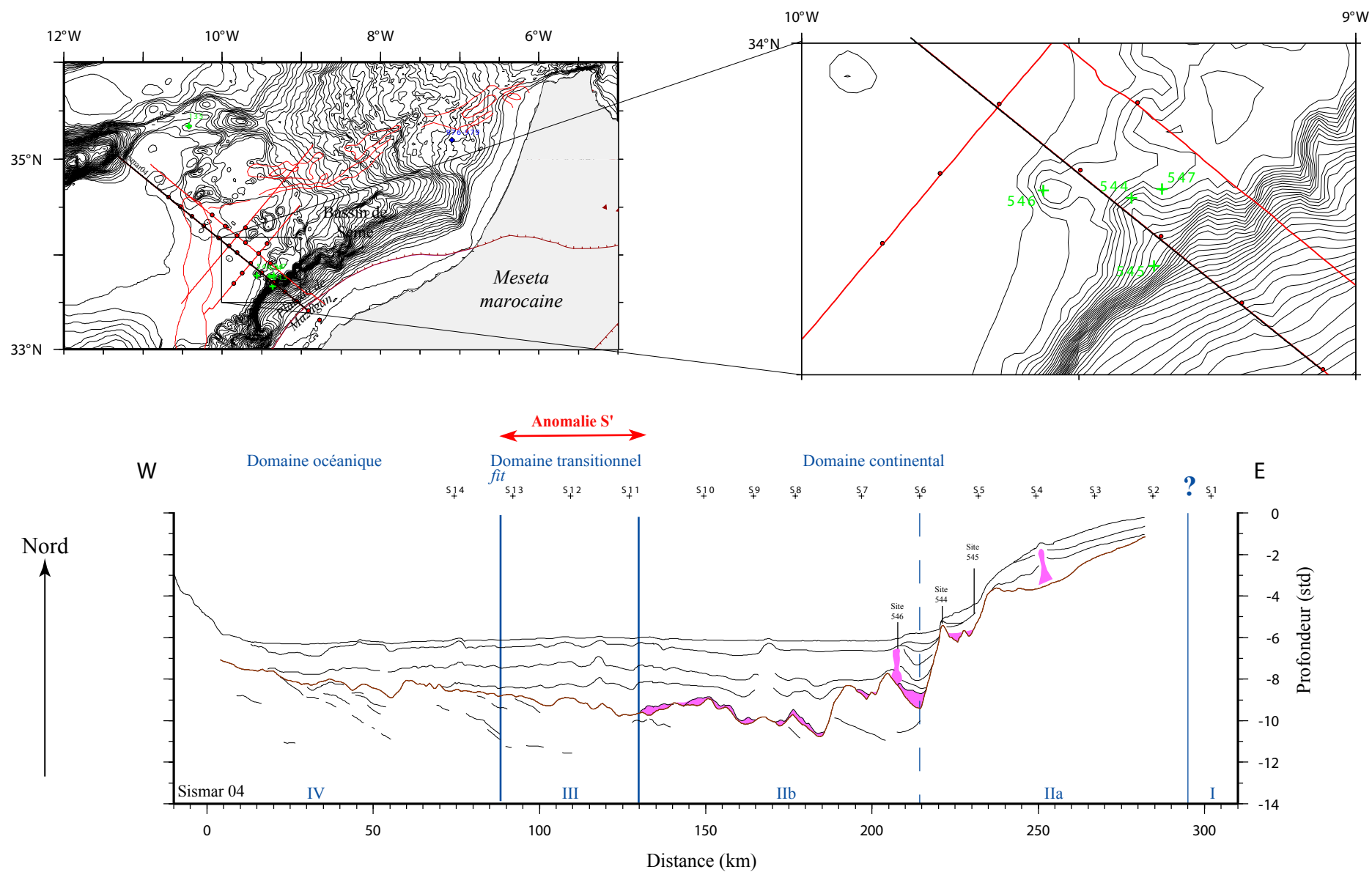
**Figure III-31 :** Synthèse des cinq coupes perpendiculaires à la marge américaine à partir des données de sismique réflexion et de sismique réfraction. Les grands trois domaines (continental, transitionnel, océanique) et les quatre zones ont été représentées. La géométrie des réflecteurs a été restituée (conversion en profondeur avec le logiciel Zelt (Zelt and Smith, 1992)). Les traits fins dans la croûte sont des courbes d'isovitesse, espacées de 0,5 km/s, et issues du modèle de réfraction.



Chapitre IV

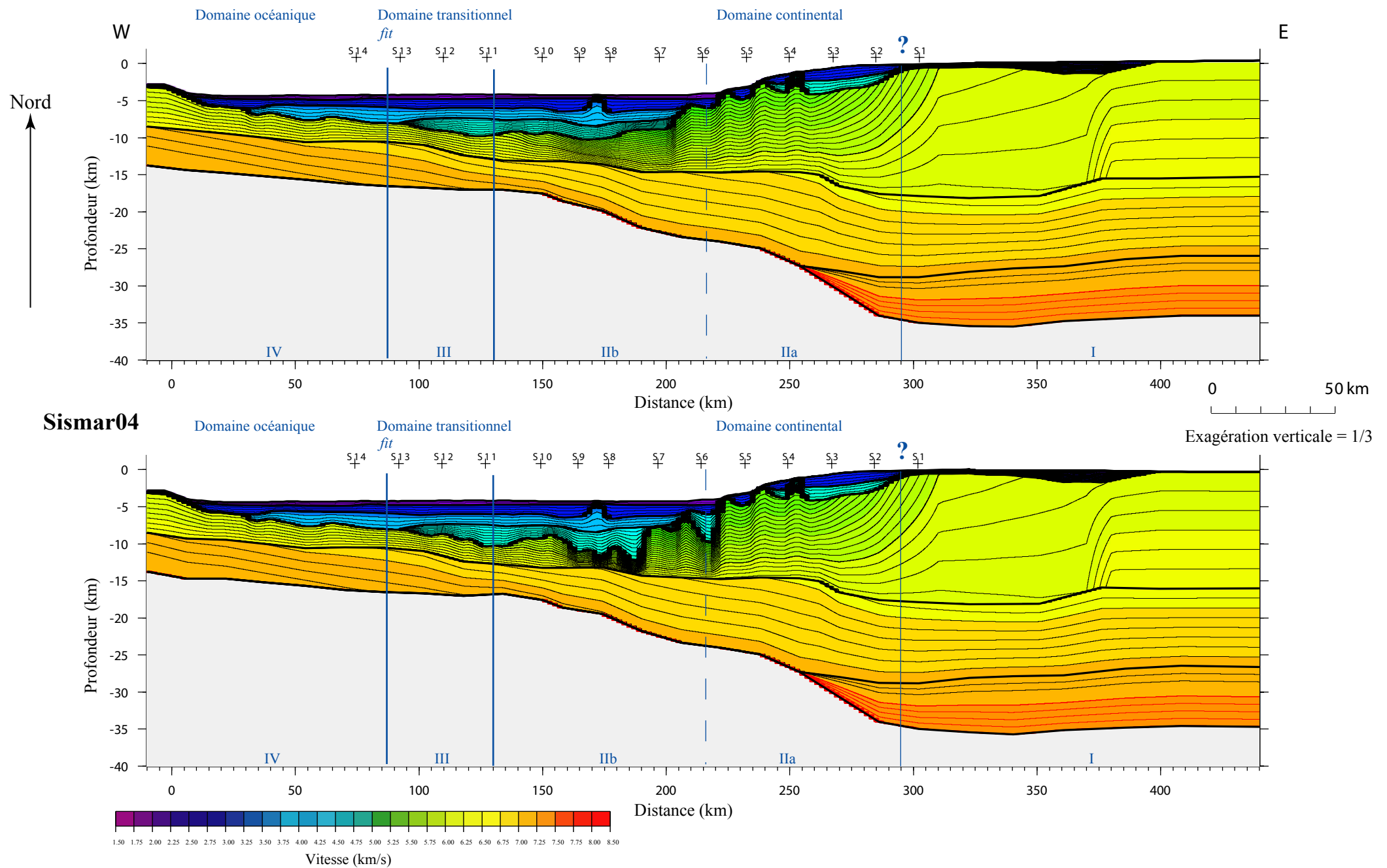
## Synthèse - Discussion



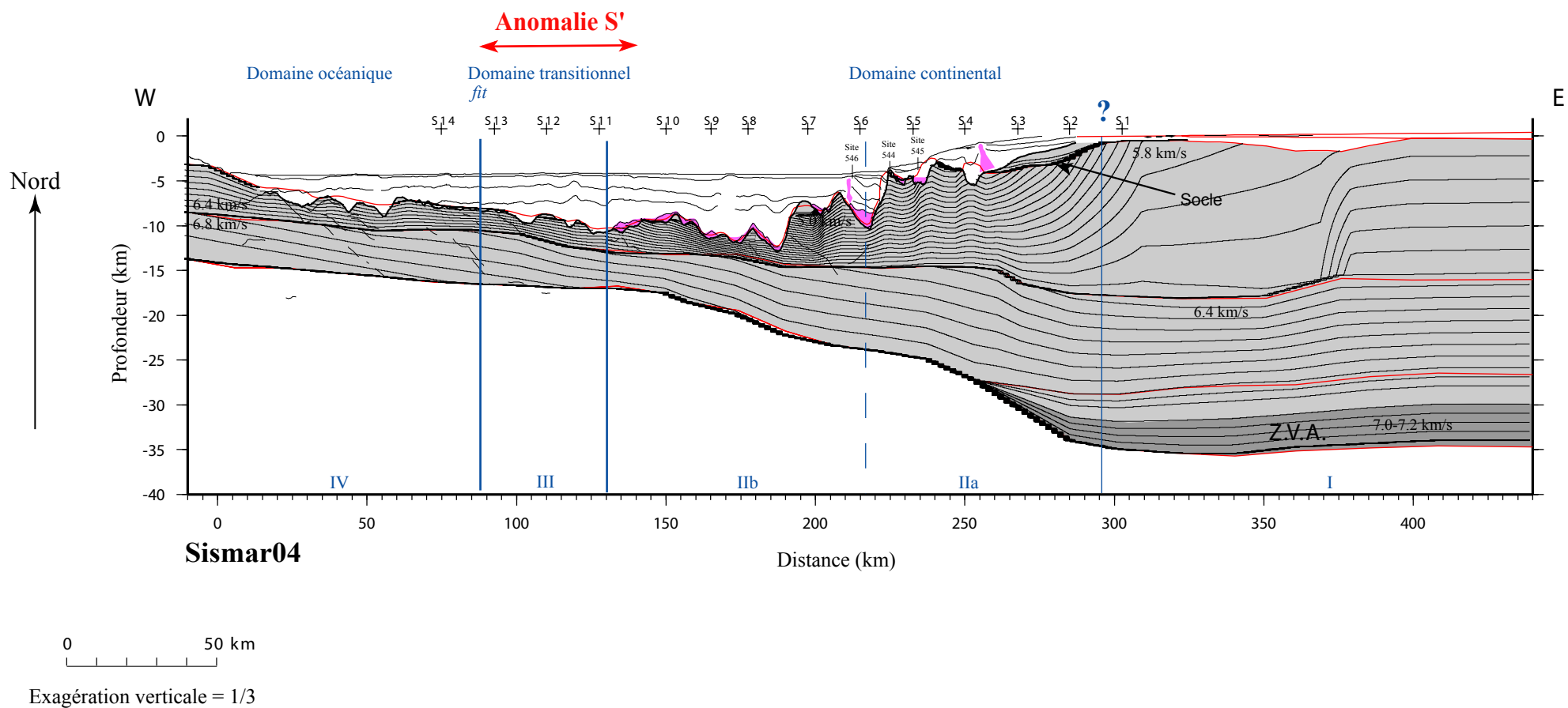


**Figure IV-2 :** Le *line drawing* du profil Sismar 04 situé dans le bassin de Seine au large de la Meseta marocaine. Nous observons que le sel est présent depuis la plate-forme jusque dans le bassin actuellement profond.

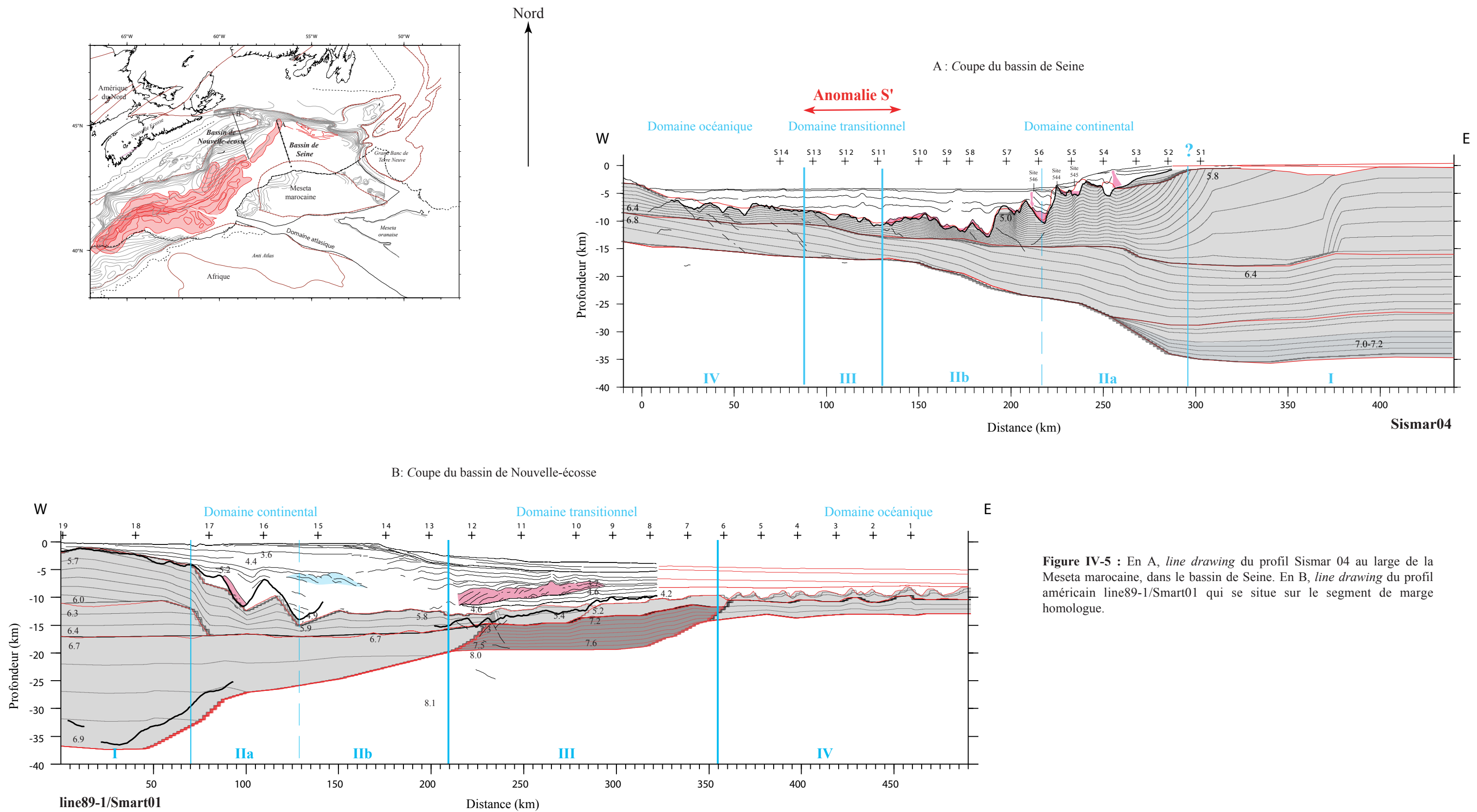




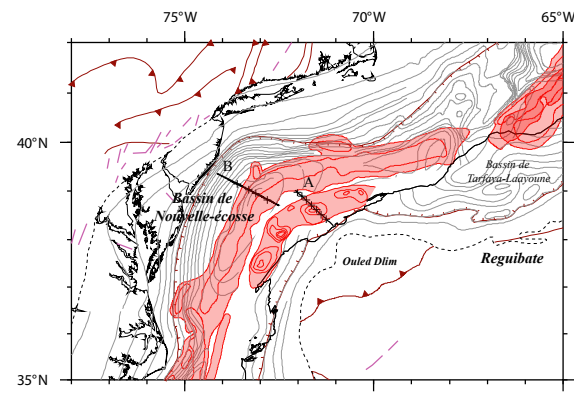
**Figure IV-3 :** Présentation de deux modèles de vitesse pour le profil Sismar04. En haut, le modèle a été traité par F. Klingelhoeffer. A partir de ce modèle, nous avons modifié les données de façon à ce que le socle montré par la réfraction s'accorde avec le socle vu par les données de sismique réflexion. La position des OBS est symbolisée par des croix.



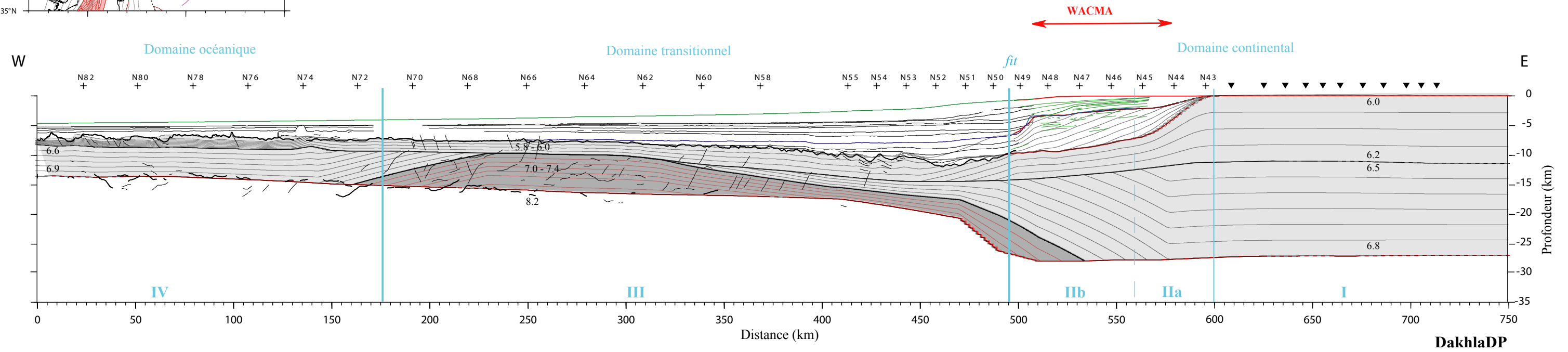
**Figure IV-4** : Synthèse du profil Sismar 04 à partir des données de sismique réflexion et de sismique réfraction. Les traits noirs indiquent que l'information est issue de la sismique réflexion, les traits en rouge de la sismique réfraction. La géométrie des réflecteurs de la couverture sédimentaire a été restituée (conversion en profondeur avec le logiciel Zelt (Zelt & Smith, 1992)). Les traits fins dans la croûte sont des courbes d'isovitesses espacées de 0,5 km/s.





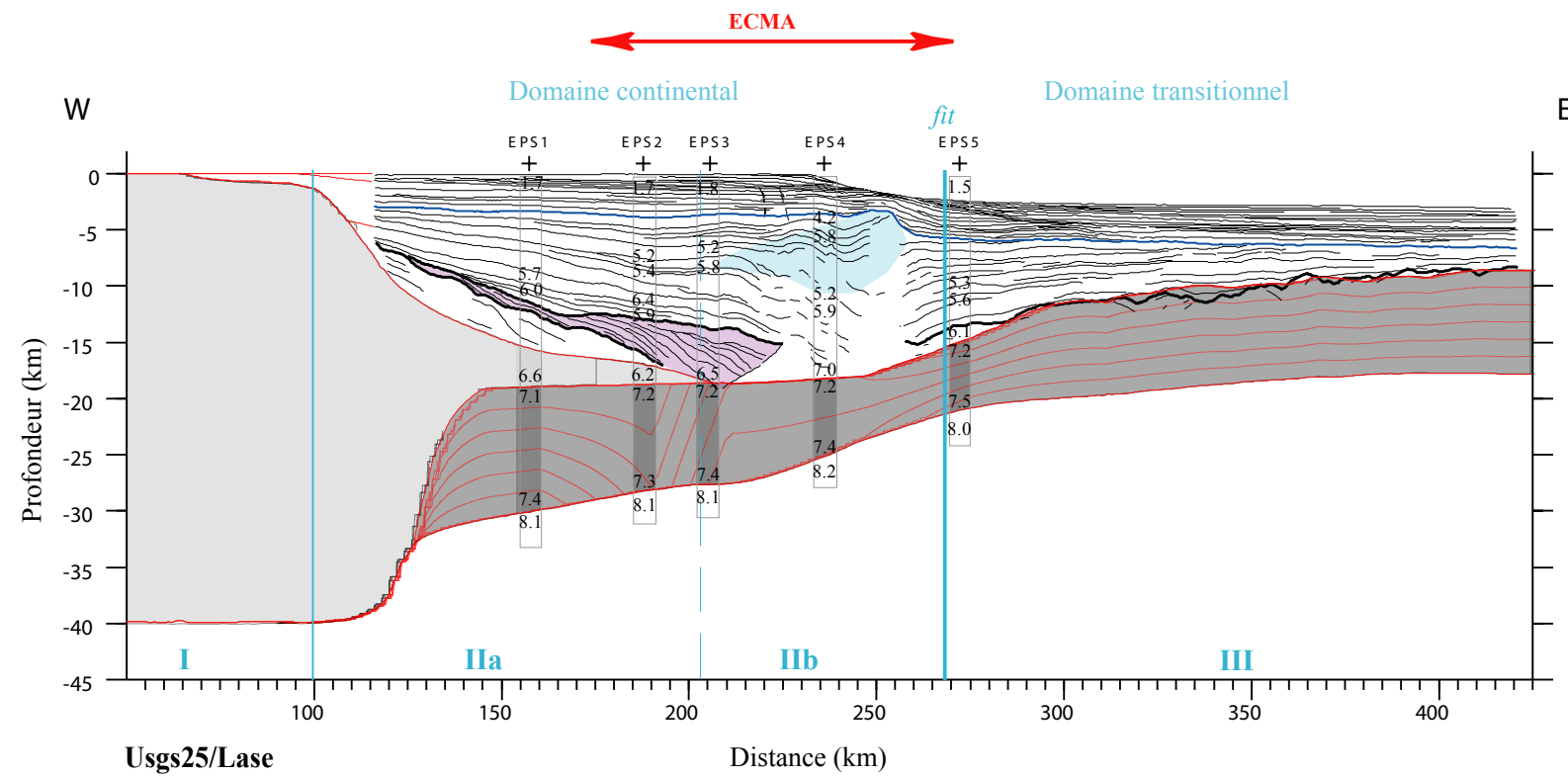


A : Coupe de la marge Dakhla



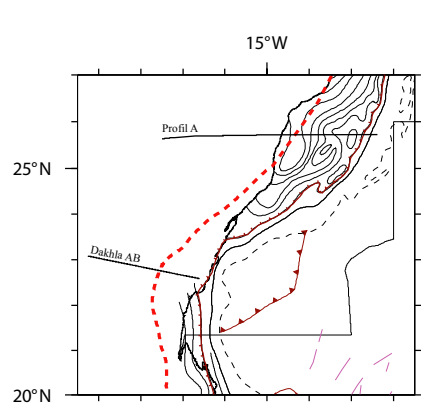
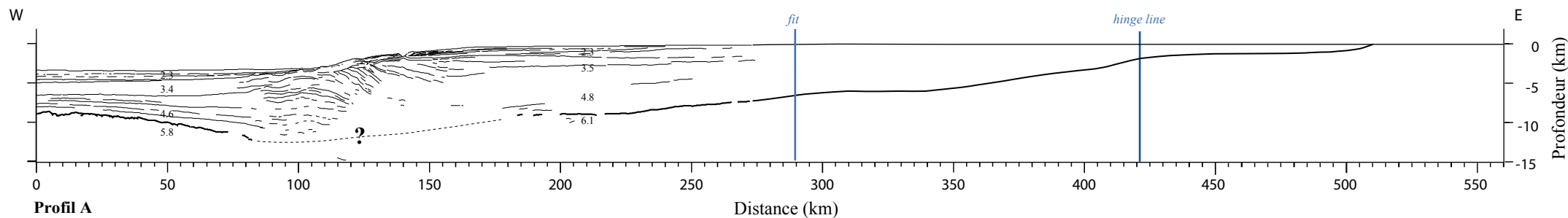
Nord

B: Coupe du bassin de Baltimore

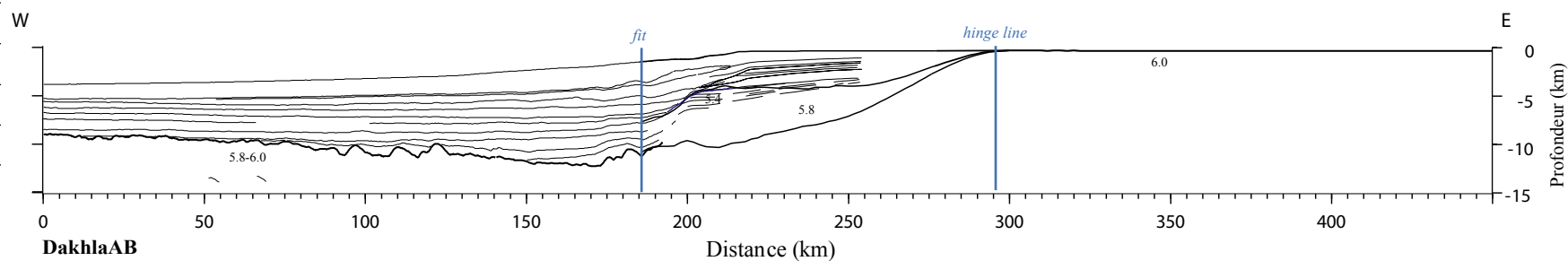


**Figure IV-6 :** En A, *line drawing* du profil Dakhla DP (profil Nord) et en B, *line drawing* du profil homologue américain Usgs25/Lase à travers le bassin de Baltimore. Notons l'asymétrie entre ces deux segments de marge probablement liée à l'héritage tectonique : la marge de Dakhla, dépourvue de bassin, fait face au bouclier précambrien de Reguibat.

A : Line drawing d'une coupe du bassin de Tarfaya-Laayoune



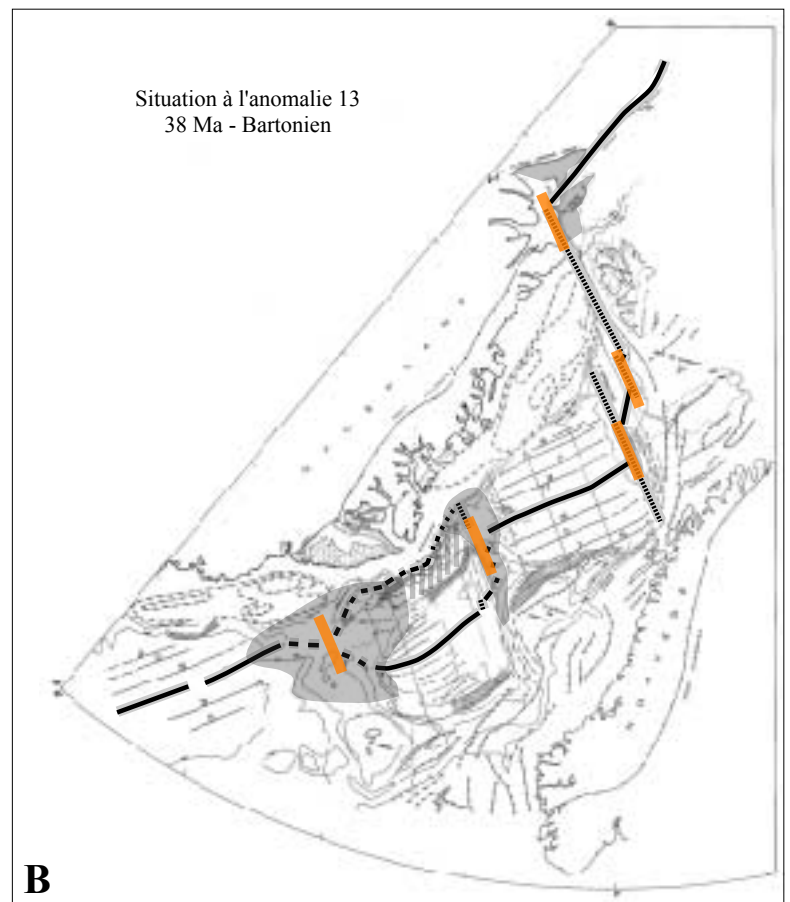
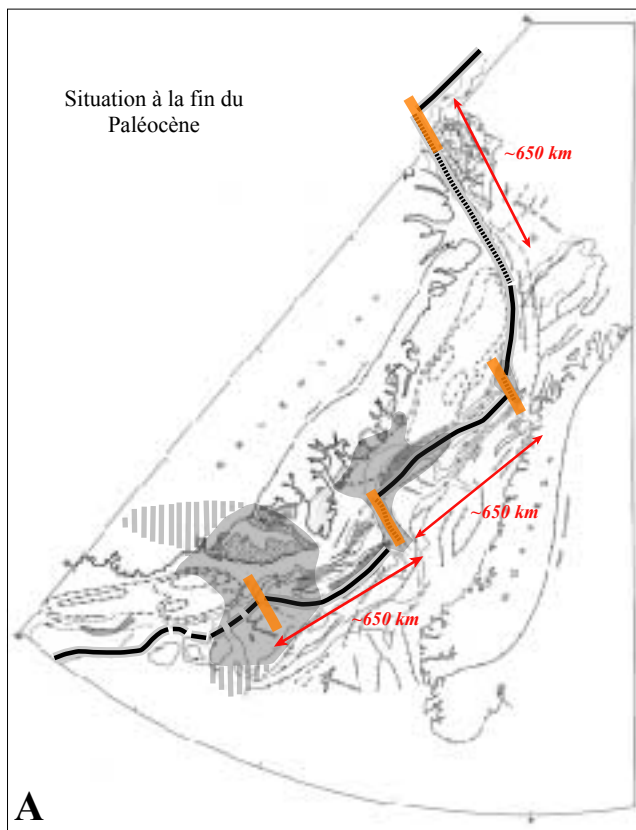
B : Line drawing du profil sud Dakhla



**Figure IV-7 :** La figure A représente un *line-drawing* d'un profil Total (De Clarens & Unternehr, *comm. pers.*) prolongé à terre par les isocontours du socle (issus de la carte internationale de Choubert *et al.*, 1968). Il montre une importante épaisseur sur le plateau et la pente continentale sur une large distance (~500 km). La figure B correspond au *line drawing* du profil DakhlaAB (profil Sud) montrant une épaisse série sédimentaire au pied de la pente continentale et une remontée rapide du socle (les dépôts s'étendent sur une centaine de kilomètres de largeur).

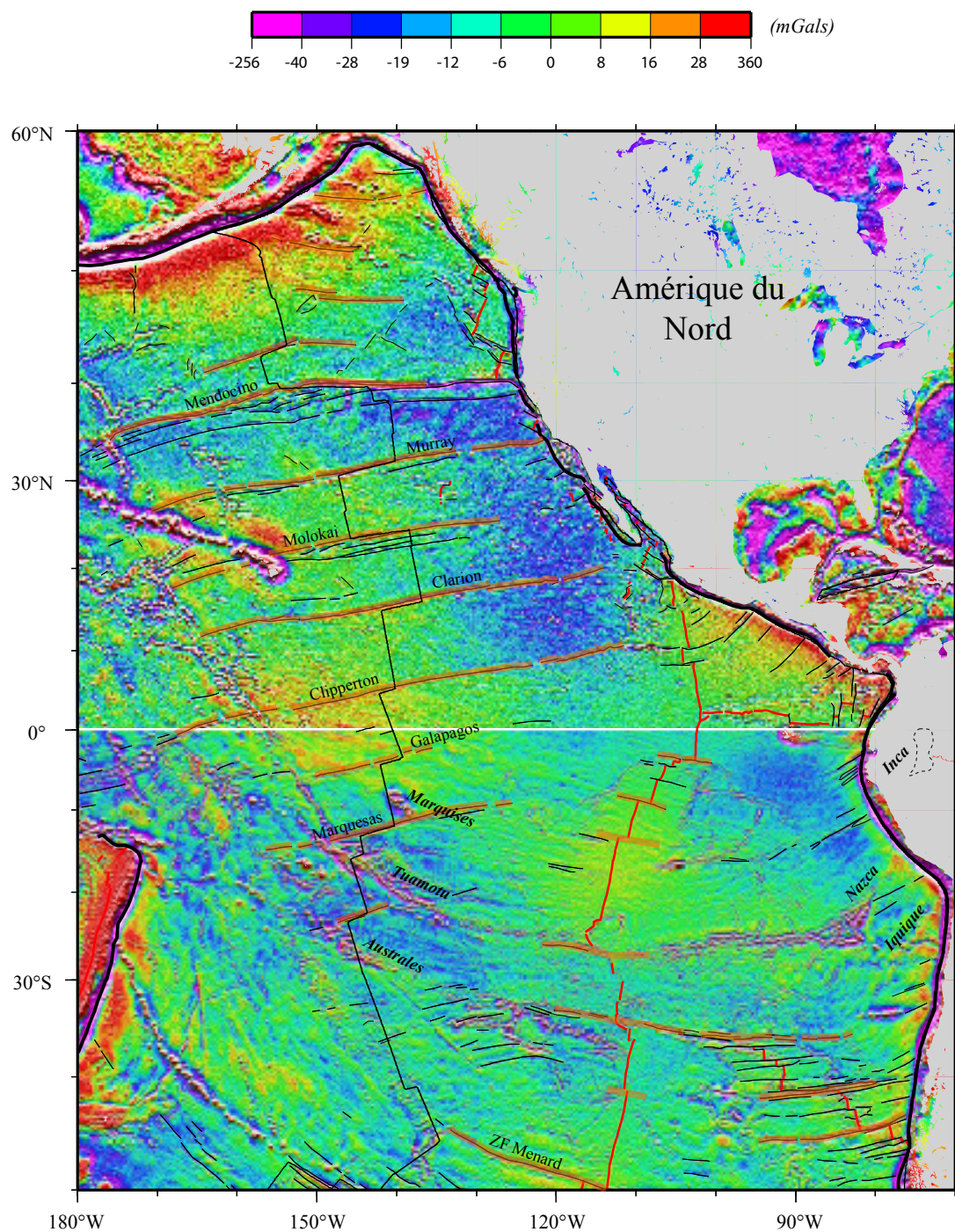
0 50 km

Exagération verticale = 1/3



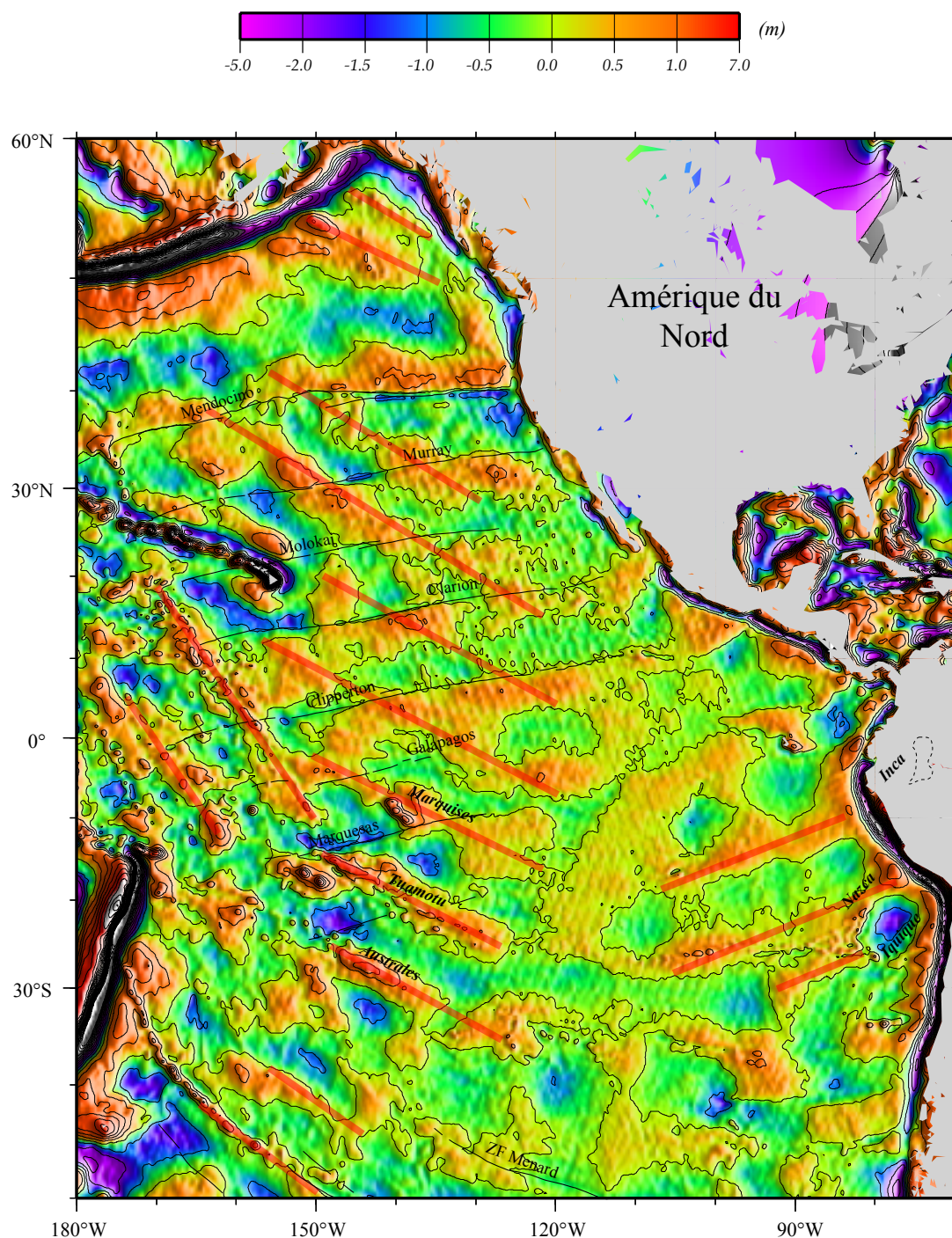
**Figure IV-8** : Evolution de la mer de Norvège et du Groenland (d'après Unternehr, 1982). La présence de discontinuités intraplaques (zone de Faeroes, plateau de Voering par exemple), marquées par les traits épais de couleur orange, découpe le domaine en segments de façon régulière (plusieurs centaines de kilomètres de longueur chacun).





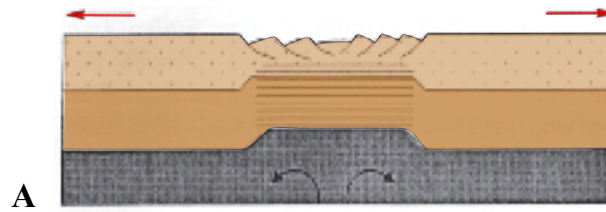
**Figure IV-9 :** Carte des données gravimétriques satellitaires (grille 1\*1 min de Sandwell and Smith, 1997). Le trait noir correspond à l'isochrone 55 Ma et le trait rouge à la dorsale. Cette carte met en évidence la répartition régulière des zones de fracture (surlignées par un trait épais orange) et des alignements volcaniques espacés par une longueur d'onde constante, de l'ordre du millier de kilomètres.



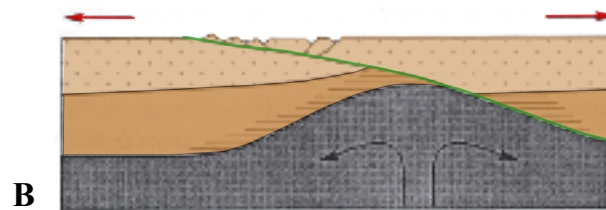


**Figure IV-10 :** Carte des anomalies du géoïde filtrées à moyenne longueur d'onde (entre 200 et 2000 km). Cette carte montre une répartition des anomalies thermique du manteau en forme de damier. Les anomalies positives (traits épais oranges) sont espacées d'une longueur d'onde de 750-1100 km (Cazenave *et al.*, 1992).

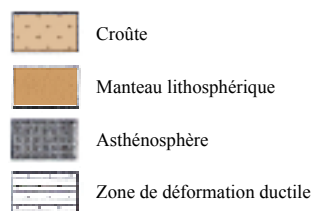
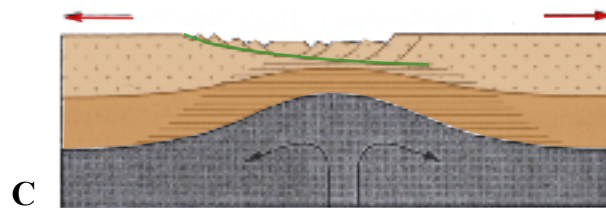
modèle de type "*pure stretching*" (McKenzie, 1978)



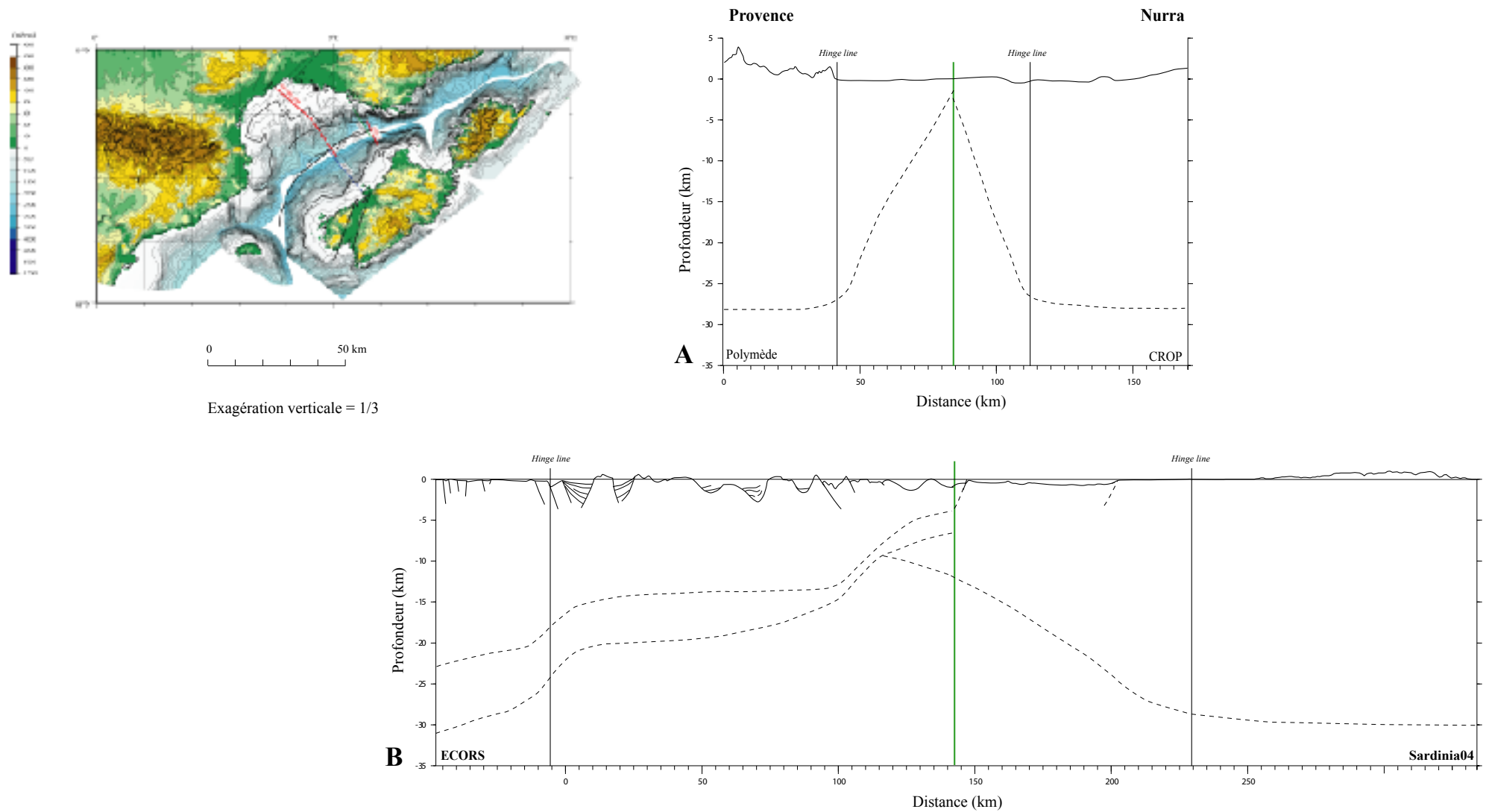
modèle de type "*simple shear*" (Wernicke, 1981, 1985)



modèle intermédiaire (Barbier *et al.*, 1986)

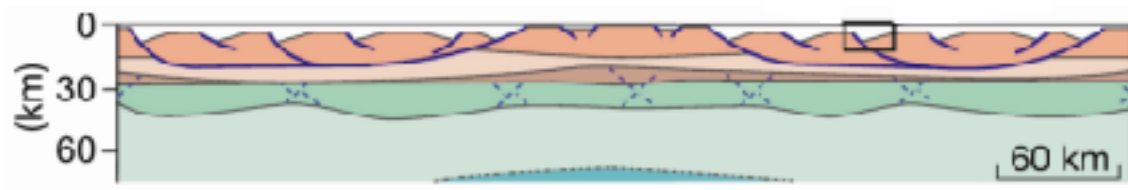


**Figure IV-11** : Modèles d'extension à l'échelle de la lithosphère (Ziegler and Cloething, 2004). En A, le modèle de type "*pure stretching*" de McKenzie (1978). En B, le modèle de type "*simple shear*" de Wernicke (1981 ; 1985). En C, le modèle de Barbier *et al.* (1986). Ces modèles partent de trois mêmes hypothèses : 1) l'amincissement a son origine dans une force horizontale que subit la plaque à ses extrémités, 2) l'extension de la croûte se fait sans variation de volume pour l'amincir, 3) l'amincissement est accompagné d'une remontée passive du manteau.

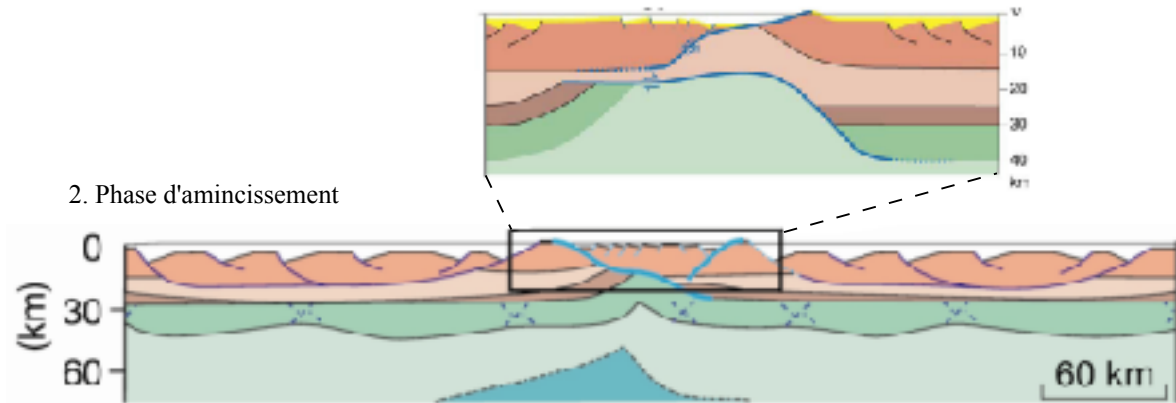


**Figure IV-12 :** En première approximation, la morphologie des bassins reflète la structure des marges et permet de mettre en évidence la segmentation des marges marquée par le passage entre des marges abruptes (en A) et des marges étirées (en B). Cette alternance de zones étendues et étroites pourrait s'expliquer par la répartition thermique du manteau.

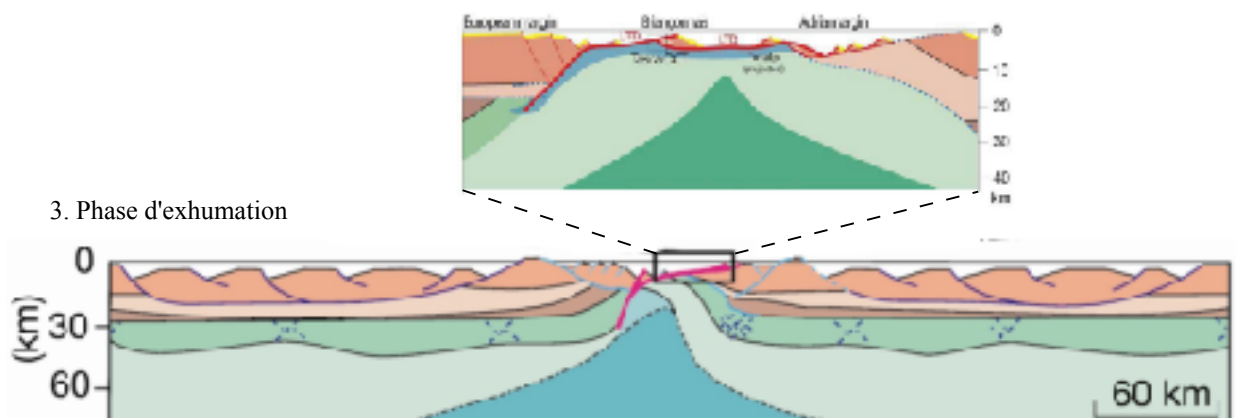
### 1. Phase d'étirement



### 2. Phase d'amincissement

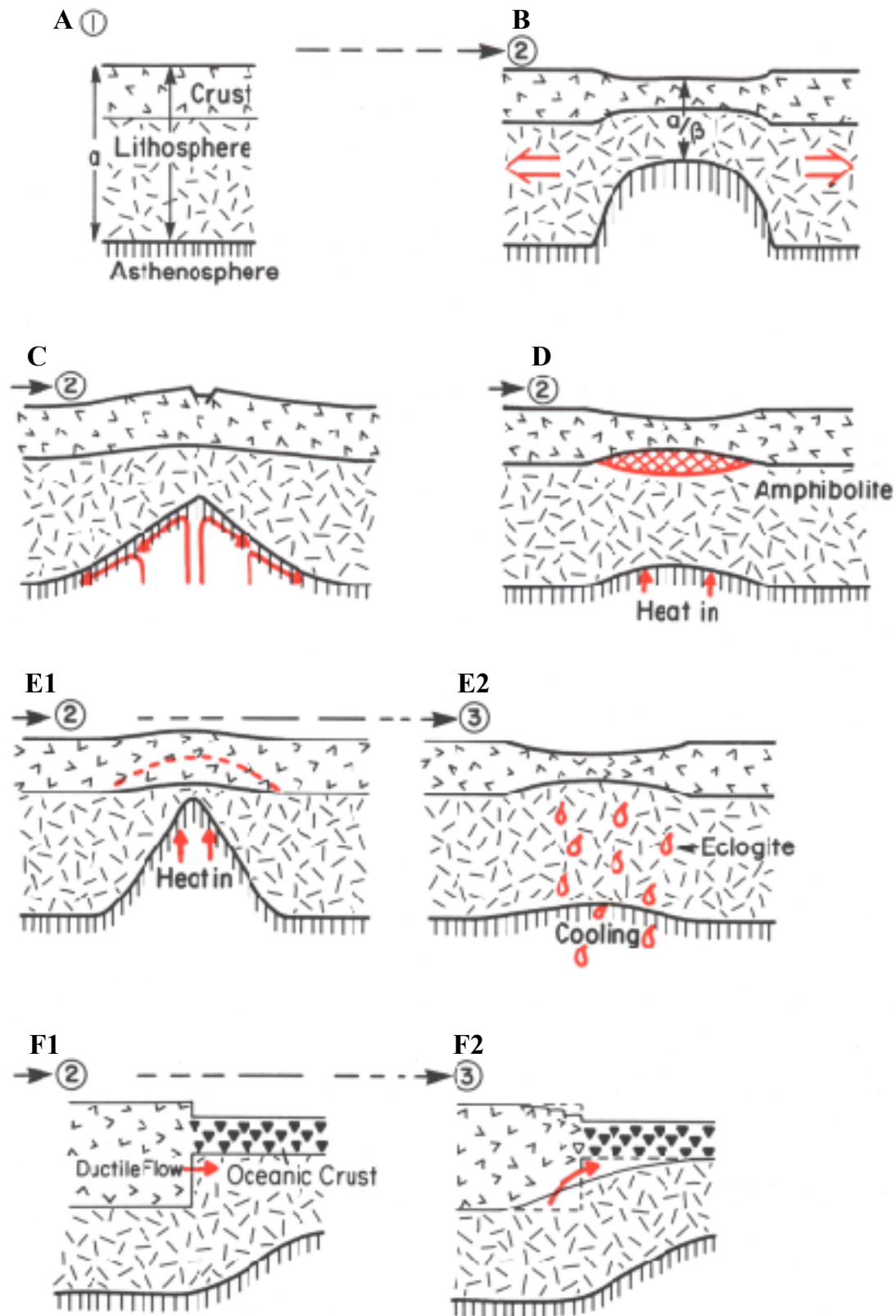


### 3. Phase d'exhumation

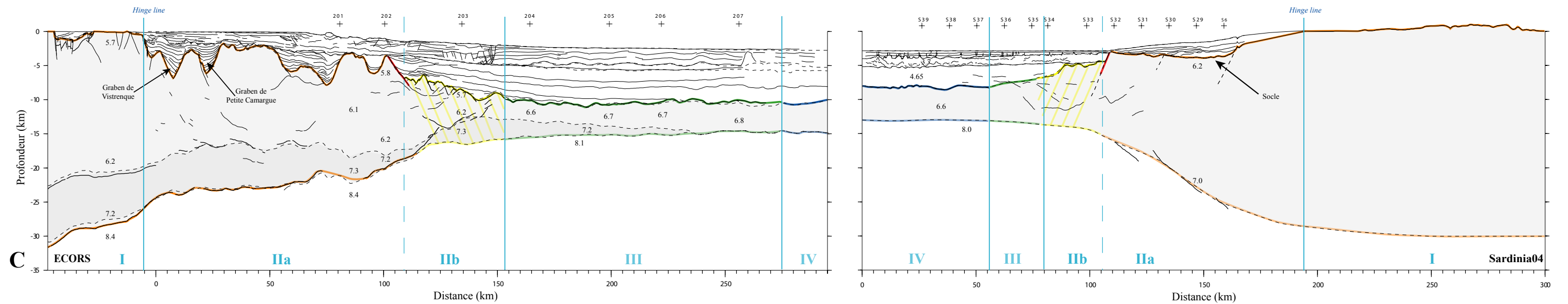
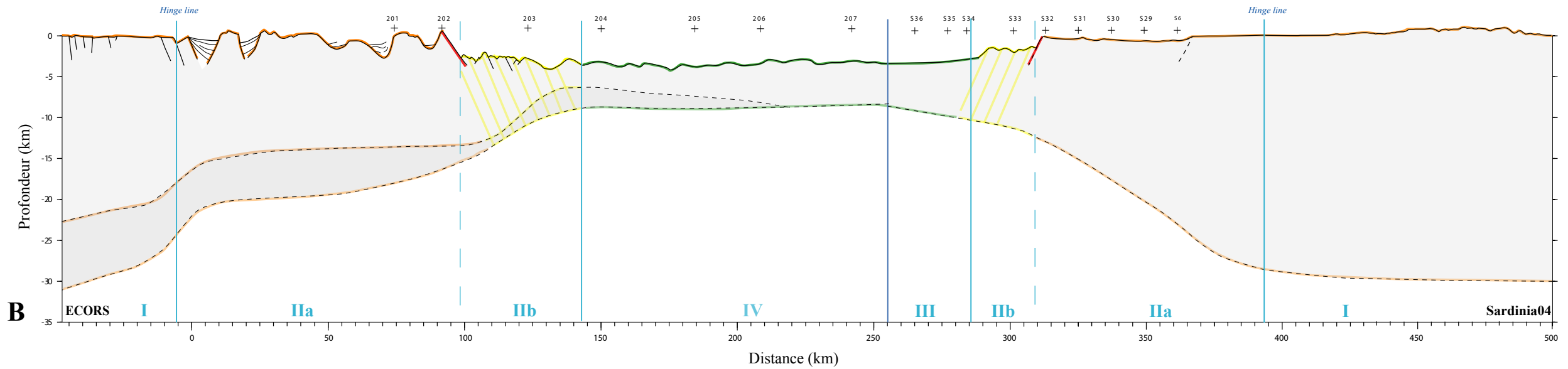
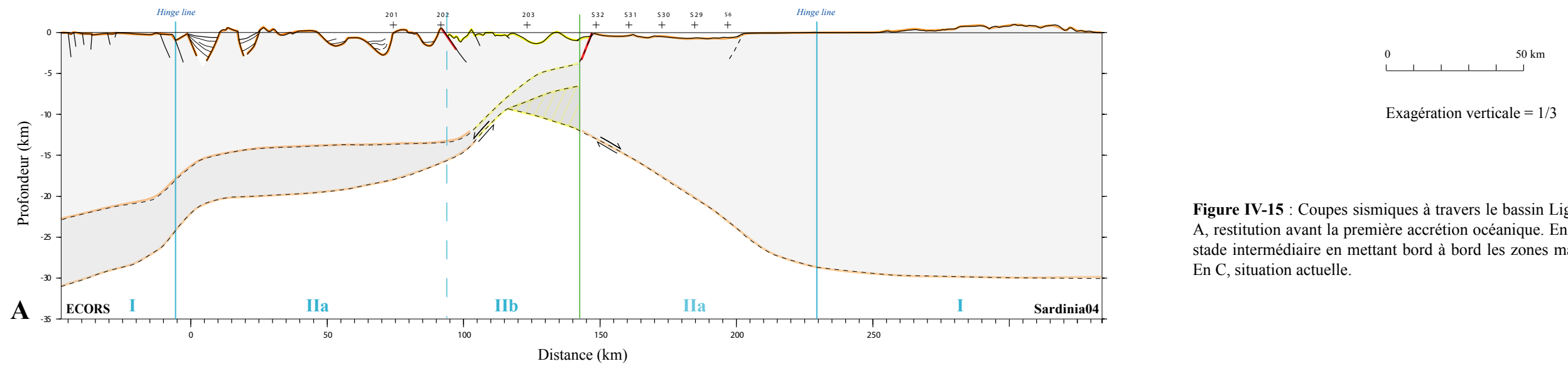


**Figure IV-13 :** Modèle d'évolution tectonique proposé par Lavier and Manatschal (2006). Les zooms (Mantacshal *et al.*, 2006) ne correspondent pas exactement aux zones indiquées par les rectangles noirs mais ont été placés ici pour donner une meilleure lisibilité aux éléments majeurs du modèle. Les auteurs distinguent trois grandes phases tectoniques : 1) une phase d'étirement accommodée par des failles à géométrie listrique (extension totale limitée) ; 2) une phase d'amincissement localisée sur une zone étroite de la partie distale de la marge marquée par des failles de détachement ; 3) une phase d'exhumation du manteau.



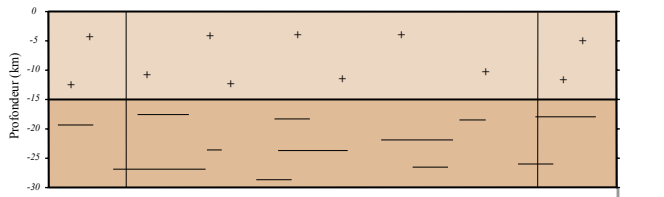


**Figure IV-14 :** Quelques exemples de modèles d'amincissement proposés dans la littérature (d'après Keen and Beaumont, 1990). En A1, le stade d'équilibre isostatique est représenté avant le début du *rifting*. Le stade B schématise un modèle d'amincissement uniforme couramment utilisé depuis une vingtaine d'années. A partir du stade C, les modèles proposés appartiennent à la catégorie des modèles sans conservation de volume de la croûte continentale. Le stade C représente un modèle érosif. Les stades D et E correspondent à des exemples de modèles métamorphiques. Le stade F est un exemple de modèle d'amincissement par flux d'origine gravitaire.

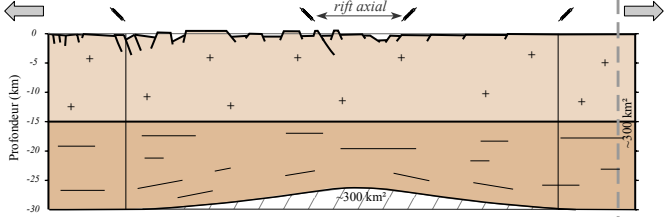


## Modèle géologique

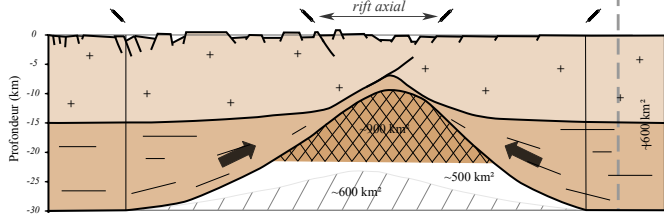
### Etat initial



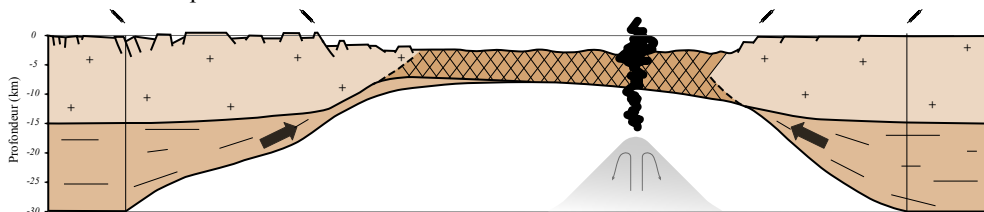
### 1. Phase d'étirement



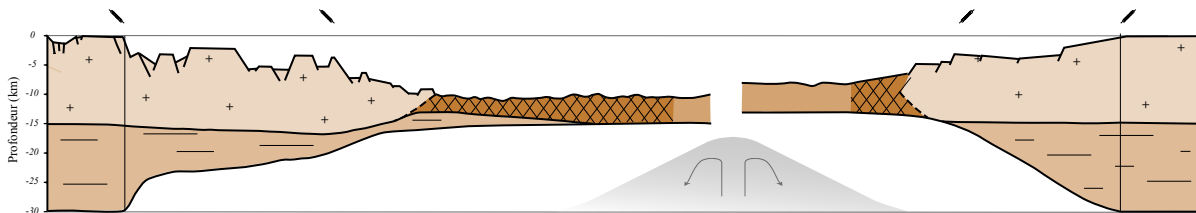
### 2. Phase d'amincissement



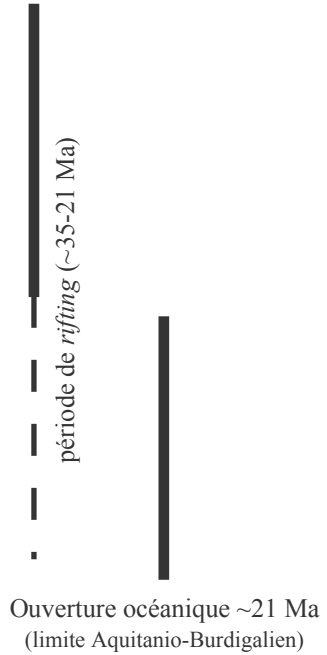
### 3. Phase de rupture



### Etat actuel



### Méditerranée



Ouverture océanique ~21 Ma  
(limite Aquitanio-Burdigalien)

Croûte proto-océanique

Accrétion océanique

### Atlantique Central



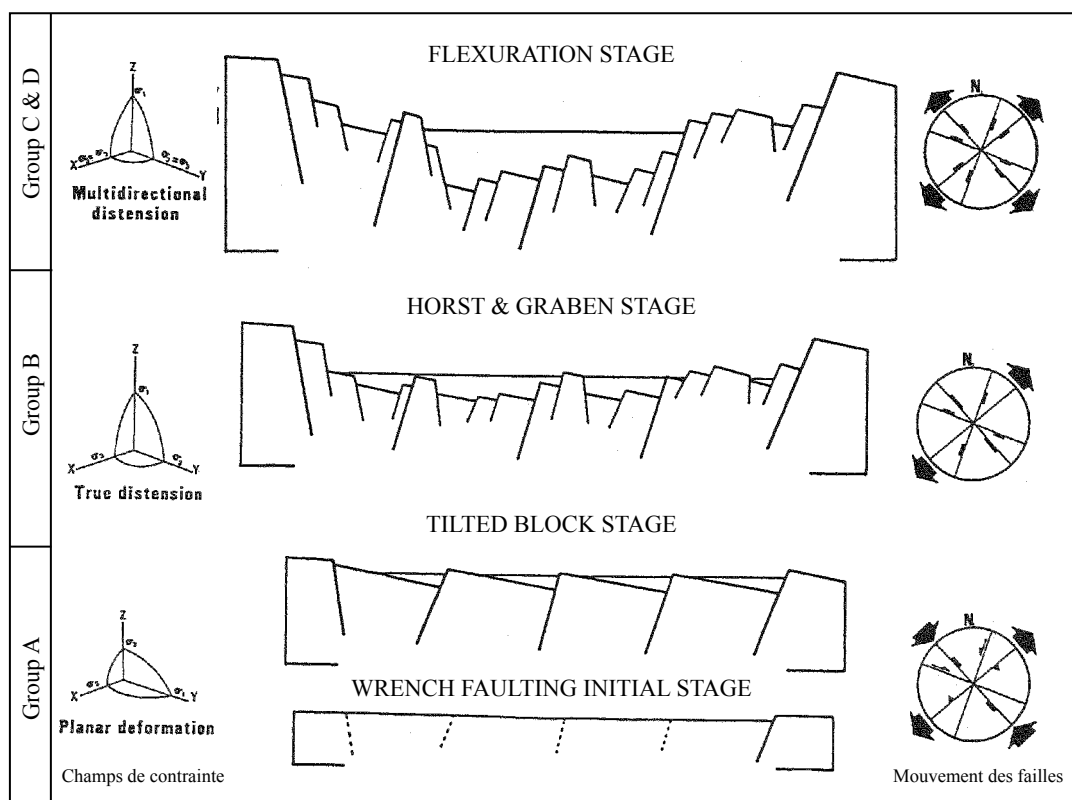
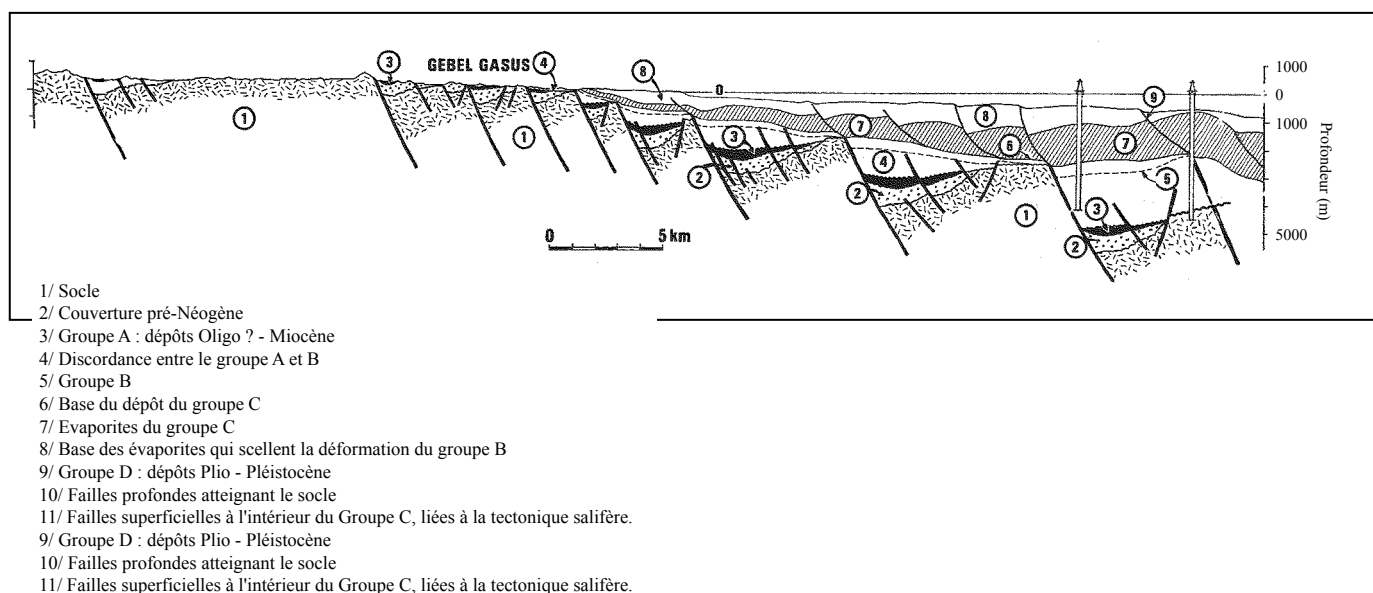
(Rhétien-Hettangien (~210-195 Ma))

~195 Ma  
(fin Sinémurien)

Accrétion océanique

0 50 km  
Exagération verticale : 1/3

**Figure IV-16** : Schéma d'évolution proposé dans cette étude composé de trois grandes phases : 1) phase d'étirement ; 2) phase d'amincissement ; 3) phase de rupture et de mise en place de la première croûte océanique atypique (croûte proto-océanique).

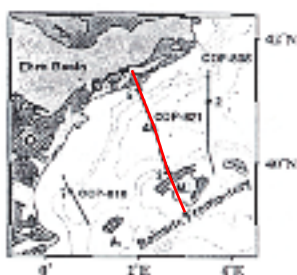
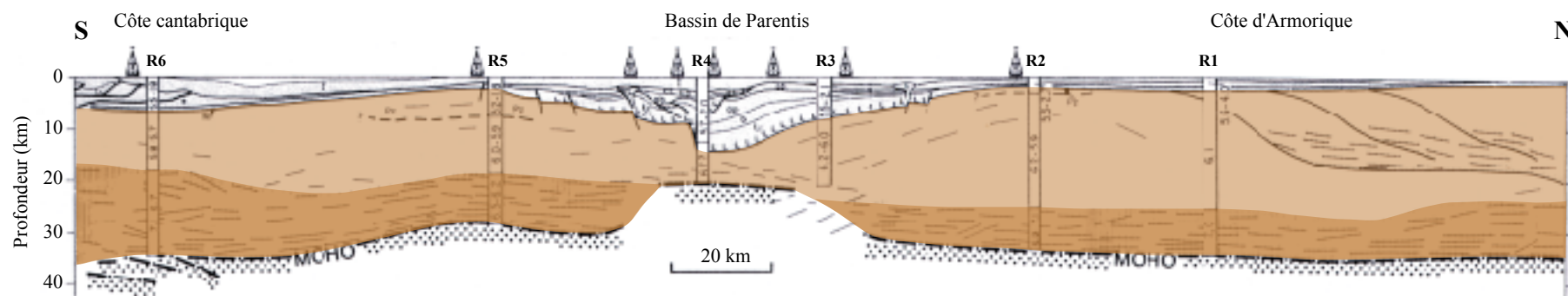


**Figure IV-17 :** Evolution tectonique et sédimentaire de la marge ouest de la mer Rouge. En haut, coupe structurale simplifiée de la marge ouest de la mer Rouge d'après une interprétation de Monténat *et al.* (1988). En bas, schéma d'évolution à quatre stades définis à partir d'une étude structurale (Monténat *et al.*, 1998).

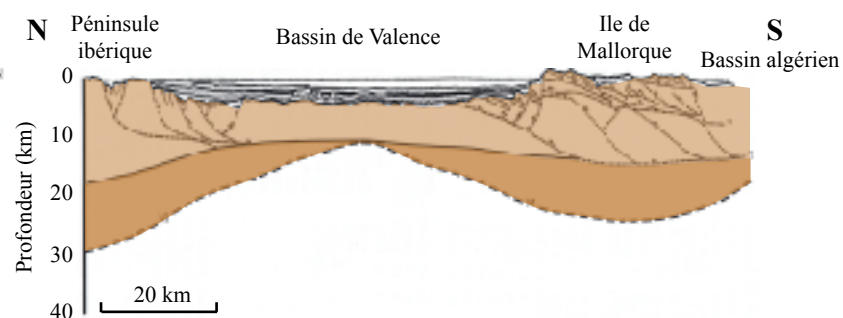




**A** : Profil de sismique réflexion ECORS Gascogne à travers le bassin de Parentis

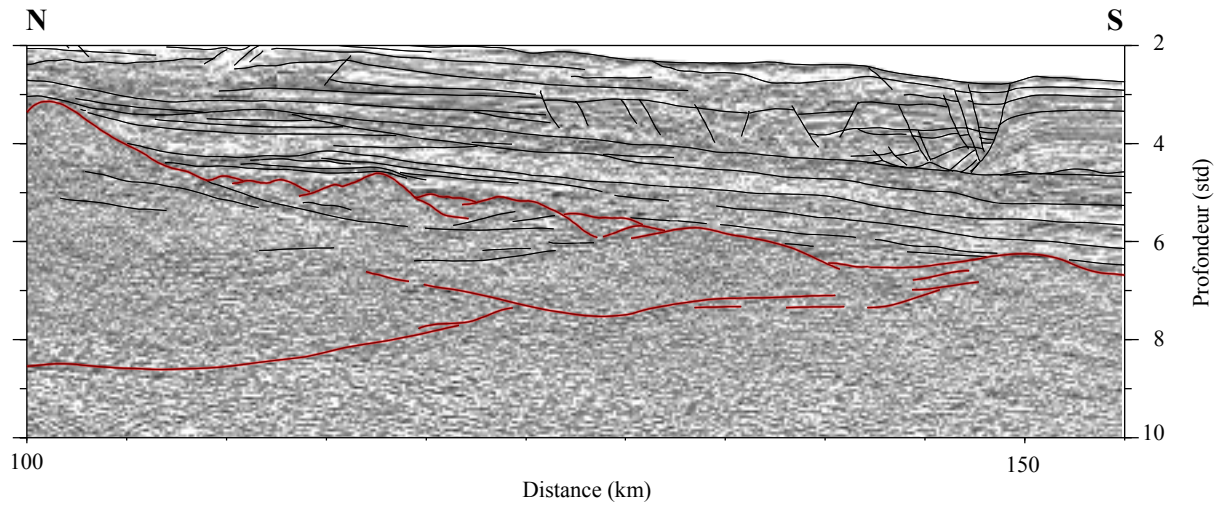


**B** : Coupe schématique à travers le bassin de Valence

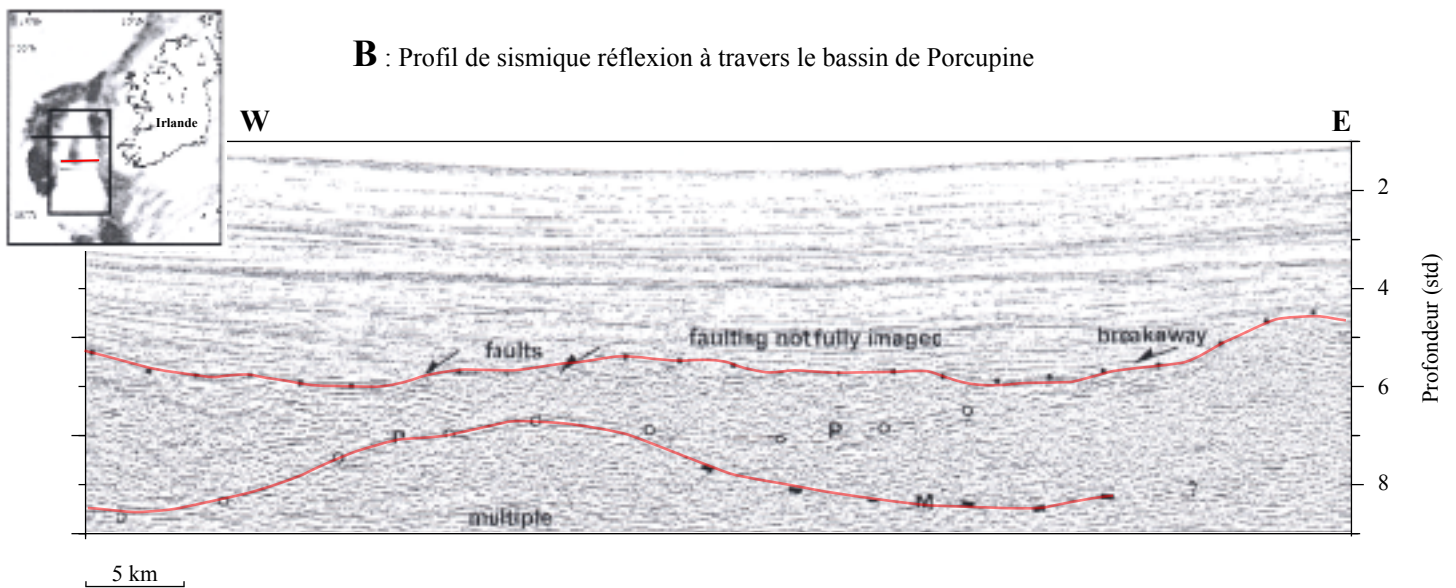


**Figure IV-18** : Illustration du découplage entre la croûte supérieure et la croûte inférieure. En A, profil de sismique réflexion ECORS Gascogne à travers le bassin de Parentis (d'après Marillier *et al.*, 1988) ; en B, coupe schématique à travers le bassin de Valence (d'après Torné *et al.*, 1996). La croûte supérieure ne montre pas de variation significative de son épaisseur tandis que la croûte inférieure disparaît sous le centre du bassin.

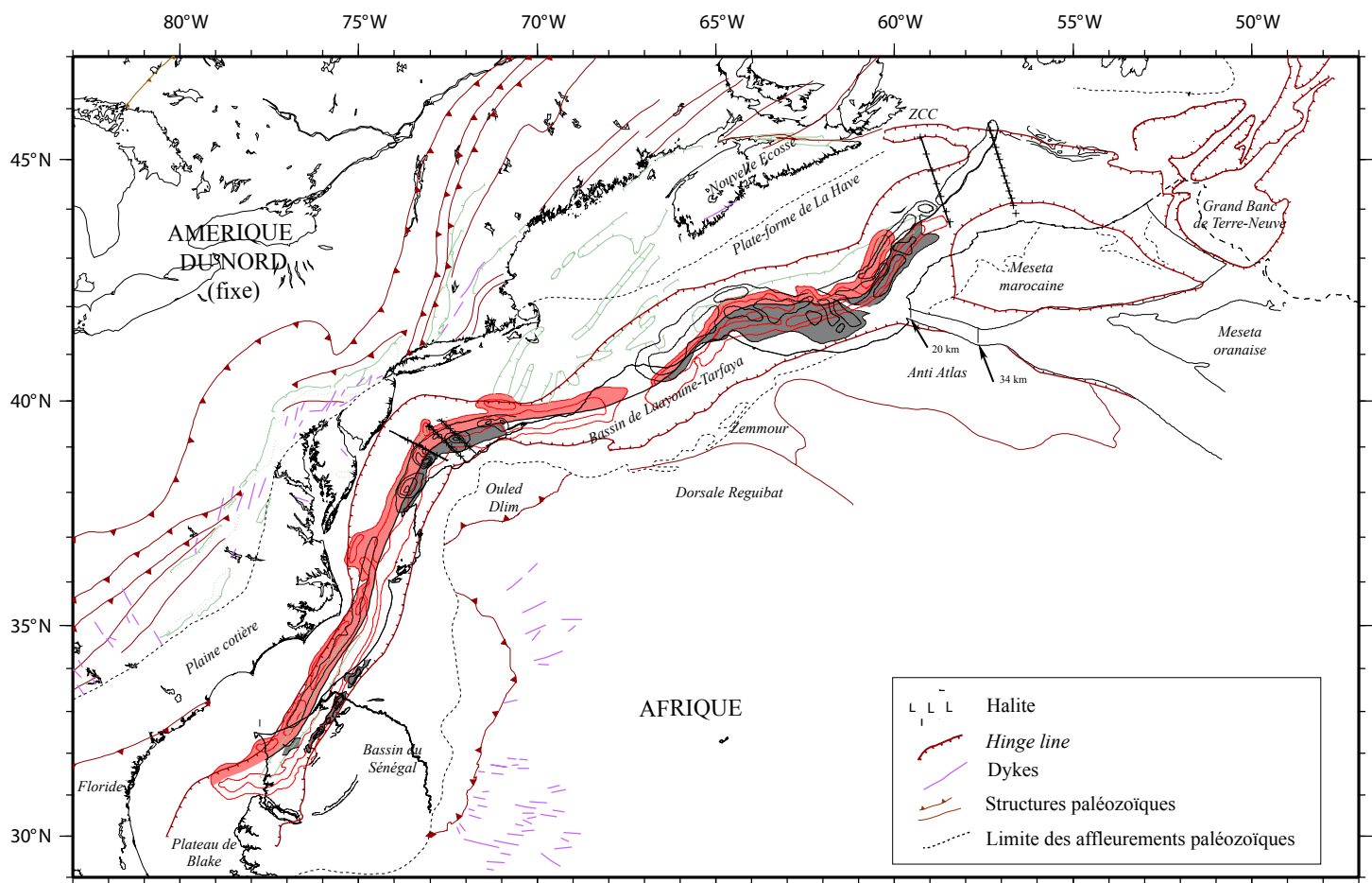
**A** : Profil de sismique réflexion ECORS NW sur la marge du Golfe du Lion



**B** : Profil de sismique réflexion à travers le bassin de Porcupine



**Figure IV-19** : Illustration de la zone de striction. En A, exemple pris au niveau du bas de pente du Golfe du Lion ; en B, profil sismique réflexion à travers le bassin de Porcupine (Reston *et al.*, 2001).



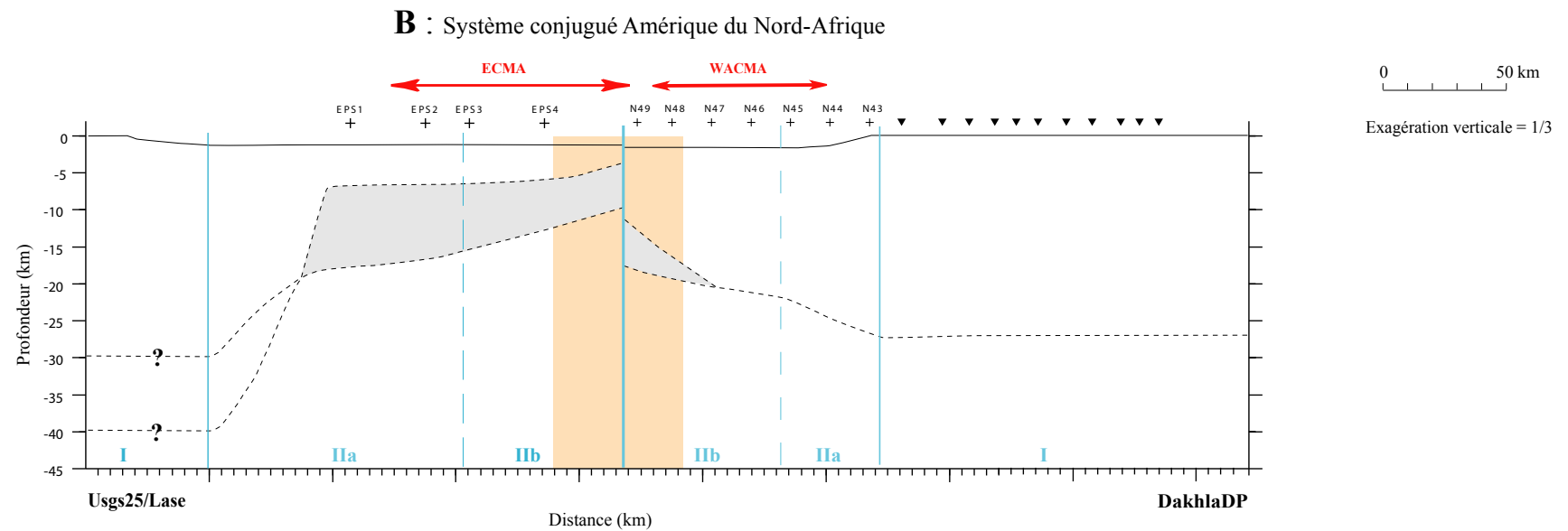
**Figure IV-20** : Reconstruction du système Meseta-Afrique-Amérique du Nord au Trias moyen, avant le début du *rifting* continental. Ici, on fait l'hypothèse qu'une partie de la croûte continentale de la zone IIb (vue sur les profils sismique) s'est possiblement formée par étirement. Cette reconstitution correspond à une fermeture maximale. En procédant ainsi, on constate qu'il reste de la croûte continentale amincie et qu'on ne parvient pas à fermer l'espace situé au large de la Meseta.

La plaque Amérique du Nord est fixe.

Les pôles utilisés sont:

AFR/AMN : 64.28°N 14.74°W Rot. = -78.05°

MES/AMN : 66.23°N 11.28°W Rot. = -73.91°



**Figure IV-21 :** Système conjugué Amérique du Nord-Afrique dans la configuration donnée par notre reconstruction avant la période d'étirement en fermeture maximale tenant compte des contraintes structurales. Les coupes sont issues des données de sismique réfraction. Nous constatons qu'il reste de la croûte continentale amincie dont le volume ne peut pas être restaurée par des mouvements horizontaux. Le colori orange montre la quantité d'étirement possible.